

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta

Biologie
Ekologie



Bc. Jan Krupička

Makroekologická analýza ekonomiky
Macroecological analysis of economy

Diplomová práce

Vedoucí závěrečné práce: Prof. David Storch, PhD.

Praha, 2016

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, DD.MM.RRRR

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi svojí participací v rozšířeném ekonomickém metabolismu umožnili napsat tuto práci, stejně jako všem kteří svojí participací v rozšířeném ekonomickém metabolismu umožnili těm ,co svojí participací v rozšířeném ekonomickém metabolismu mi umožnili napsat tuto práci, stejně jako těm kteří,..... atd.

Abstrakt: Brown et al. (2011) navrhli fundamentální podobnost mezi organismy a ekonomikami národních států založenou na rozvodných sítích nutných k fungování metabolismu/ekonomiky a omezeních z nich vyplývajících podle Metabolické teorie ekologie. Tato práce má primárně za účel prozkoumat zda tyto omezení figurují i v rámci jednotlivých sektorů ekonomiky a jejich vztahu k některým dalším makroekonomickým a demografickým ukazatelům.

Klíčová slova: ekologie, makroekologie, metabolická teorie ekologie, ekonomie, energie

Abstract: Brown et al. (2011) proposed a fundamental similarity between organisms and the economies of nation-states based on the distribution networks necessary for the functioning of the metabolism / economics and limitations arising from them according to the Metabolic theory of ecology. This work is primarily intended to investigate whether these limitations figure even within individual sectors of the economy and their relation to some other macroeconomic and demographic indicators.

Key words: ecology, macroecology, metabolic theory of ecology, economy, energy

Obsah

1. Úvod a cíle.....	5
2. Přehled literatury.....	8
2.1 Metabolická teorie ekologie.....	8
2.2 Makroekologie člověka a klíčová role energie.....	10
2.3 Škálování a města.....	13
2.4 Malthusiánsko-Darwinistická dynamika.....	14
2.5 Thomas Malthus a principy populace.....	15
3. Data a metody.....	17
3.1 Data.....	17
3.2 Metody.....	18
4. Výsledky.....	21
4.1 Hrubá přidaná hodnota a energetická intenzita ekonomiky.....	24
4.2 Vícerozměrné vztahy některých socioekonomických jevů.....	32
4.3 Allometrie porodnosti a metabolismu.....	39
5. Diskuze.....	43
6. Přehled literatury.....	45

1. Úvod a cíle

Žijeme v době diskuze o tom, jestli žijeme v nové době - Antropocénu. Respektive žijeme v době mnoha takových diskuzí, každá týkající se jiného aspektu toho nového údobí. (Ellis & Trachtenberg, 2014). Od technické debaty v geologii jestli vůbec - a pokud ano, jak - definovat tuto novou epochu (Zalasiewicz et al., 2008), přes výzkum změn přírodních procesů vlivem lidské aktivity (Ellis 2015) až po etické otázky o roli a závazcích člověka v době, kdy se lidstvo samo stalo významnou silou v celoplanetárním měřítku (Palsson et al. 2013).

Co k tomu může ekologie dodat? Jakkoli silný je lidský vliv na tuto planetu, člověk je jen dalším z biologických druhů a platí pro něj stejné přírodní zákony jako pro ostatní organismy, měl by tedy být zkoumatelný stejnými postupy a metodami, za použití stejných teorií, které používají pro zkoumání ostatních organismů přírodní vědy (Burnside et al., 2012). Ale většina prací na poli biologie, které se věnovaly především vlivu člověka na zbytek přírody, ne zkoumání struktur, které tento zvláštní druh ultrasociálního savce (Richerson & Boyd, 1998) vytváří, či jak jsou tyto struktury ovlivňovány právě okolním prostředím.

Takovýto výzkum struktur lidské společnosti, jejich vývoje a faktorů, které se na něm podílejí, samozřejmě existoval, ale prováděl se především na půdorysu společenských věd, respektive prováděl se na něm především během jejich klasického období a skončil s tzv. kulturním obratem na konci druhé třetiny dvacátého století (Nash 2001).

Teprve nedávno přišel impuls k rozšíření biologického výzkumu tímto směrem od skupiny vědců okolo Santa Fe institutu (Santa Fe Institute, SFI) v Novém Mexiku zabývajících se makroekologií. Ti tvrdí, že právě použití makroekologických metod v kombinaci s velkými objemy nashromážděných dat o lidské společnosti dokáže

přinést vhled do kauzálních vztahů v socioekonomickém metabolismu lidstva, jak nazývají sumu socioekonomických procesů.

Právě analogie lidské společnosti s metabolismem organismů jim umožňuje použít tzv. metabolickou teorii ekologie (MTE) pro popis lidských společností pomocí zkoumání paralel mezi rozvodnými sítěmi energií, živin aj. v těle živých organismů a rozvodnými sítěmi vybudovaných člověkem. V následující kapitole se tedy pokusím přiblížit MTE, seznámit čtenáře s některé poznatky z pole lidské makroekologie a vyložit tzv. Malthusiánsko-Darwinistickou dynamiku (Malthusian-Darwinian dynamic, MDD) (Nekola et al., 2013), na kterou se mnohé práce týmu okolo SFI odvolávají a dále se pokusím nastínit některé aspekty práce Thomase Malhuse o růstu populace, která je biologům (většinou) známa jen zprostředkovaně skrze práce Římského klubu a podobných organizací.

Ve čtvrté a páté kapitole se budu věnovat analýze některých vývodů prací z druhé kapitoly, především těm o závislosti využívané energie a velikosti národních ekonomik a témat, které v této práci (Brown et al., 2011) doporučili k dalšímu zkoumání, ale kterým nebyla doposud věnována žádná pozornost. V poslední kapitole se pak budu věnovat závěrům z těchto poznatků vyplývajících s přihlédnutím ke konceptu udržitelnosti, ke kterému se většina z prací v oblasti lidské makroekologie nějakým způsobem vztahuje.

2. Přehled literatury

2.1 Metabolická teorie ekologie

Metabolismus představuje specificky biologický proces, ale jeho fungování se řídí základními fyzikálními a chemickými zákonitostmi. Metabolická teorie ekologie se právě z nich snaží vysvětlit struktury a dynamiku ekologických systémů (Brown et al., 2004). Její základní východiska by se dala shrnout následovně (O'Connor et al., 2007):

1) Předpokládá, že kvazi-fraktálové struktury distribučních sítí v organismu, jakou je např. oběhová soustava, vyžadují alometrii (např. $\text{metabolismus} = \alpha \cdot \text{hmotnost}^\beta$, kde α je „normalizační konstanta“ a β je škálovací exponent), aby byly minimalizovány náklady na transport energie a živin.

2) Tvrdí, že k minimalizaci těchto transportních nákladů dochází, pokud škálovací exponent β , který sám slouží jako základ škálovacích exponentů jiných vlastností (mortality, délky dožití, aj.) – které jsou násobky $\frac{1}{4}$, se rovná $\frac{3}{4}$.

3) Spojuje metabolismus a teplotu skrze Boltzmannovu konstantu popisující kinetiku základních biochemických reakcí.

Jak uvádí Brown et al. (2004), formulování takzvaných alometrických rovnic, které vysvětlují většinu dlouho známých závislostí vlastností organismů na velikosti těla jako mocninných funkcí ve formě $Y = \alpha M^\beta$, kde Y je závislá proměnná (jako například rychlost metabolismu) a M je hmotnost, se připisuje Huxleymu (1932). O velikosti škálovacích koeficientů se dlouho empiricky vědělo, že odpovídá zhruba násobkům $1/4$ (např. Kleiber 1932 pro rychlost metabolismu), nikoli násobkům $1/3$, jak by se dalo předpokládat z geometrického vztahu mezi objem těla a jeho povrchem.

Vysvětlení nabídli West et al. (1997, 1999), a to za pomoci již zmíněné představy rozvodných sítí v organismu (oběhová, vylučovací aj.), jejichž větvení je kvasi-fraktální strukturou, kde exponent $3/4$ představuje jakési evoluční optimum, k němuž by měl divergovat vývoj struktury organismů, má-li být dosaženo ideálního poměru pro zásobování buněk živinami.

Univerzálnost tohoto exponentu napříč skupinami byla předmětem mnoha kontroverzí (srovnej např. Farrell-Gray et al. 2005 a White et al. 2007) a je v poslední době zpochybňována. Tříčtvrteční exponent je obvyklý pouze pro eukaryota, u nichž se projevuje omezení rozvodnými sítěmi v tkáních organismu. U prokaryot a u bakterií existují jiné exponenty (cca 2 a 1) i jiné mechanismy, které limitují rychlost metabolismu (O'Connor et al. 2007). U prokaryot se jedná o dostupnost membrán, neboť od určité velikosti mají eukariotické buňky výhodu, neboť mají organely, na nichž může metabolismus probíhat – nejsou tak omezeny pouze svojí buněčnou membránou; u bakterií je to velikost buněk, protože od určité velikosti přestává být výhodné dopravovat látky z velké vzdálenosti do mitochondrií, a je tedy lepší spojit malé buňky rozvodnými sítěmi (DeLong et al., 2010).

Stejně tak v rámci makroskopických eukariot se exponent liší napříč jednotlivými taxony, ačkoli v průměru se blíží $3/4$. Jediná skupina, která odpovídala předpokládané závislosti, byl hmyz (Issac & Carbone, 2010). U ostatních, např. u savců, bylo zjištěno, že vztah mezi hmotností a metabolismem není lineární, ale představuje exponenciální křivku (Issac & Carbone 2010, Kolokotronis et al. 2010).

2.2 Makroekologie člověka a klíčová role energie

Zůstaneme-li však u základního vztahu mezi rychlostí metabolismu (B) a jeho hmotností (M):

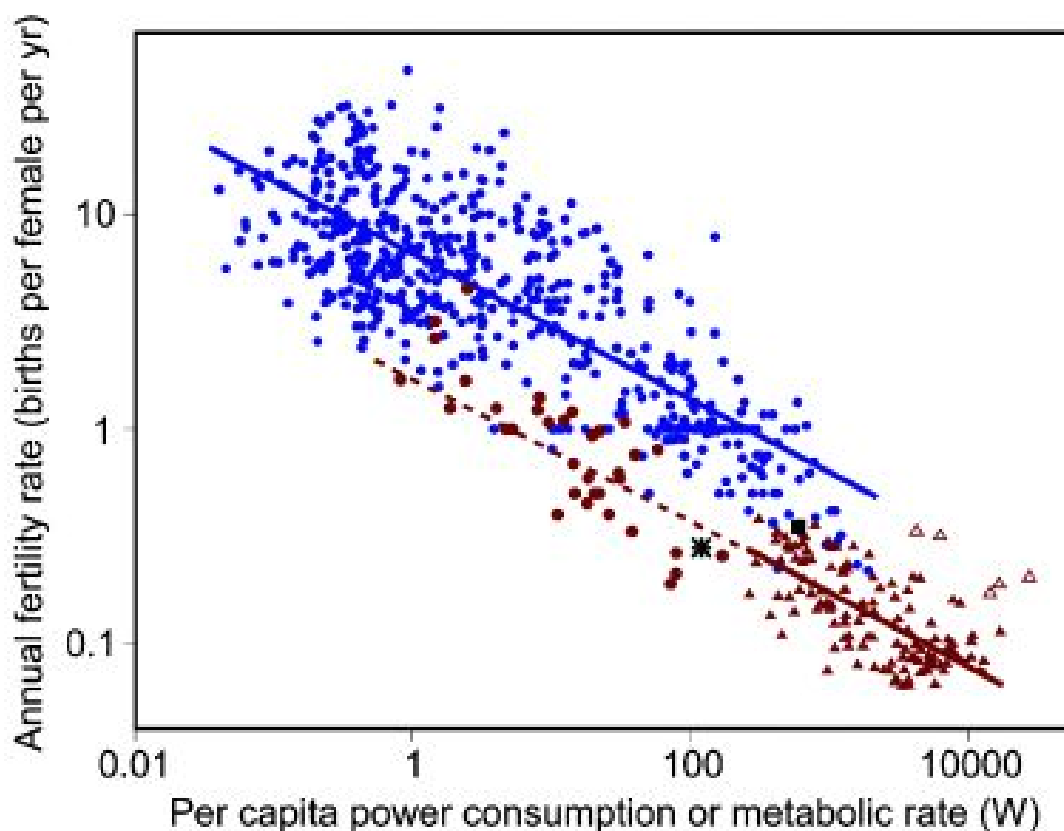
$$B \propto M^{3/4}$$

pro jeho jednoduchost a možnost formulovat snadno testovatelné hypotézy, tak pokud zároveň víme, že fertilita (F) - tak jako mnoho dalších biologických jevů, jako je např. srdeční frekvence - závisí na hmotnosti podle rovnice

$$F \propto M^{-1/4}$$

můžeme z toho dosazením odvodit vzorec pro závislost rychlosti metabolismu (B) - neboli přijímané energie (E) - a fertility:

$$F \propto E^{-1/3}$$



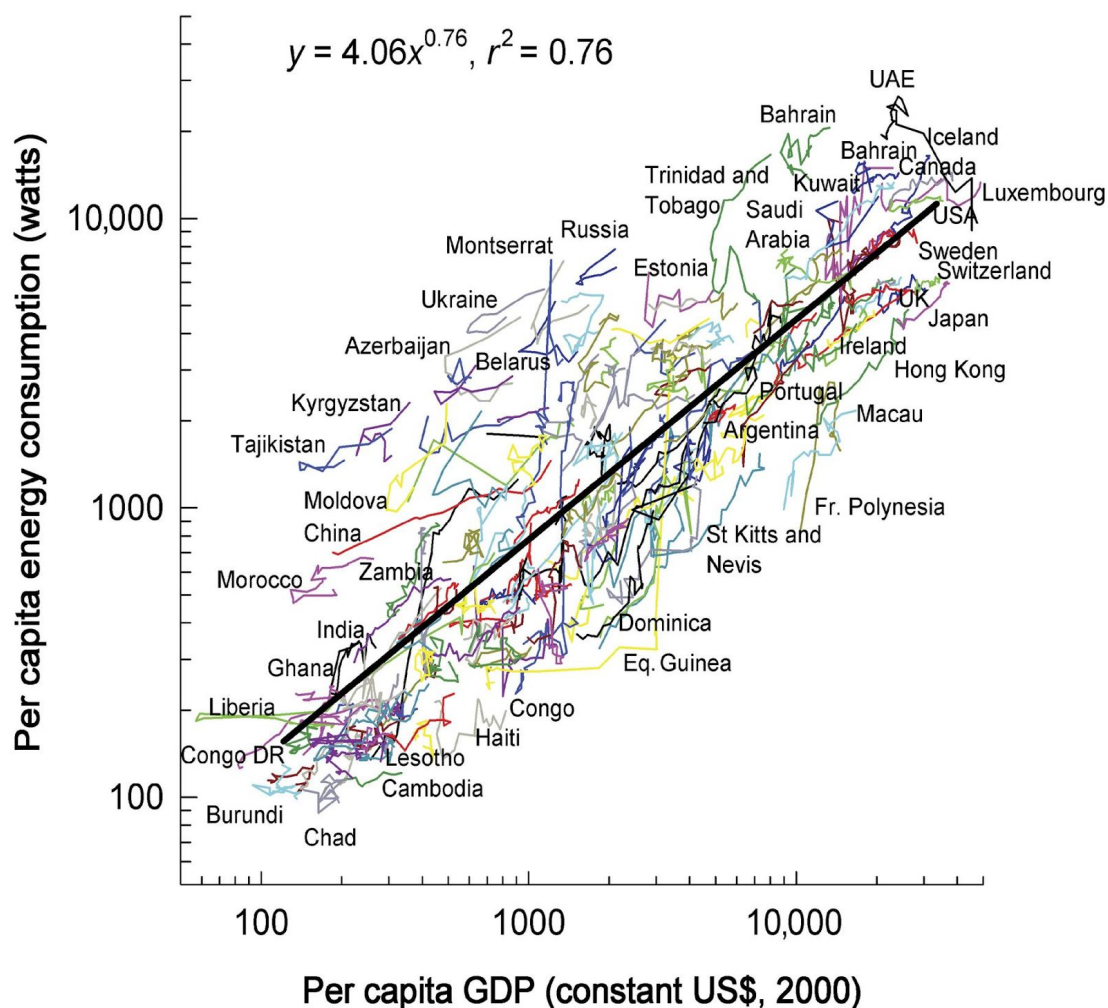
Obr. 1 Závislost fertility na energii přijímané organismy, ať už metabolické (modré body) nebo i extrametabolické u lidských společenstev (červené body). Převzato z Moses & Brown (2003)

Právě takovému vztahu se věnovala jedna z prvních prací o makroekologii člověka vůbec. (Moses & Brown, 2003) ukázali, že fertilita lidí (červené body) závisí stejným způsobem na přijmané energii tak jako u savců (modré body) a to nejenom u lovců a sběračů ale i moderních společností, pokud započítáme i extrametabolickou energii kterou každý z nás využívá a která představuje jeho podíl na energetickém metabolismu socioekonomických procesů, který je vytvářen a udržován pomocí konzumace energie v podobě fosilních paliv, jaderné elektřiny aj.

Jednalo se o poměrně překvapivý výsledek, protože neexistuje na první pohled důvod, proč by měla porodnost lidí následovat extrametabolickou energii, protože ta přímo nezvětšuje jejich tělesnou hmotnost. Autoři spekulovali, že právě rozvodné sítě v lidských společnostech (infrastruktura - elektrická přenosová soustava, dopravní tepny atd.) podléhají analogickým omezením jako rozvodné sítě v organismech, což stojí za nalezenou závislostí. Přesné kauzální působení ovšem dodnes zůstává záhadou.

Na energii využívanou socioekonomickými systémy se zaměřili i (Brown et al., 2011). Je známo, že růst ekonomiky závisí na spotřebovávané energii (Smil 2008, Payne 2010), Brown et al. (2011) se rozhodli kvantifikovat tuto závislost za pomoci MTE. Chytrou intuicí ztotožnili velikost národní ekonomiky ve velikosti hrubého domácího produktu s velikostí organismu v kilogramech a vyšlo jim, že národní ekonomiky se podřizují stejné alometrii růstu jako živé organismy, tak jak to předpokládá MTE, podle rovnice

$$E \propto G^{3/4}$$



Obr. 2 Závislost energetické intenzity ekonomiky (ve wattech na osobu) a její velikostí (v dolarech na osobu) graf Brown et al. 2011

Jak je z grafu ovšem vidět, rozdíly v energetické intenzitě ekonomiky¹ se mohou u zemí s podobným příjmem na obyvatele značně lišit a samotná intenzita extrametabolické energie se může lišit skoro až o dva řády. Brown et al. (2011) sice spekulují o několika možných vysvětlení zbytkové variability - energie spotřebovaná na termoregulaci socioekonomického metabolismu, ať už v podobě vytápění nebo chlazení, či fakt, že země, které těží fosilní paliva, na tuto těžbu vydávají značné množství energie, které poté exportují do ostatních zemí - ale navrhuji to pouze jako předmět pro další studium, sami v tomto ohledu data dále nezpracovávají.

¹ V průběhu celého textu budu používat místo výrazu „Spotřeba energie“ (Energy consumption), který používají Brown et al. (2011) výraz „Energetická intenzita ekonomiky“ pro vysvětlení viz kapitola 4.1

Tyto možná vysvětlení budou analyzována v kapitole 5.2.

(Brown et al. z této závislosti vyvozují, že limitace ekonomiky spotřebou energie je nevyvratitelným faktem a růst ekonomiky tak bude vždy omezen těmito limity, není tedy možný tzv. „andělský růst“, tj. zvyšování HDP bez zvyšování spotřebovaných zdrojů. Tento předpoklad nepodrobují v článku dalšímu zkoumání², proto je kapitola 5.1. analýza škálování metabolismu primárního, sekundárního a terciárního sektoru národních ekonomik.

Ze zjištěného vztahu mezi velikostí ekonomiky (G) a spotřebovávanou energií (E) můžeme vyvodit pomocí dosazení do dříve zmíněného vzorce $F \propto E^{-1/3}$ závislost mezi velikostí ekonomiky a fertilitou

$$F \propto G^{-1/4}$$

To je překvapivě v rozporu s dříve publikovaným článkem Bauch (2008), zabývajícím se tímto vztahem, který se sice také odvolává na MTE, ale dochází k empirickému zjištění, že exponent v tomto případě odpovídá -1/3. Podrobněji se na to podíváme v kapitole 5.3

2.3 Škálování a města

Specifickým druhem lidských socioekonomických systémů které byly zkoumány pomocí MTE jsou města. Ty, kromě klasických rozvodných sítí jakými jsou ulice, elektrické dráty, vodovodní potrubí a další fyzické infrastruktury které podle (Brown et al., 2011) limitují rozsah socioekonomického systému, v sobě koncentrují i lidské bytosti, což vede k stále intenzivnějším lidským interakcím ve velkoměstech (Bettencourt 2013).

Odlišností těchto sociálních sítí oproti těm fyzickým je (mimo

² Ačkoli se mu prý chtěli původně podrobněji věnovat, výsledky byly prý „zmaten“. zdroj: Brown, osobní sdělení

jiné) exponent který řídí jejich škálování. Zatímco tak u fyzických sítí je $\beta < 1$, tyto sítě rostou pomaleji než populace a umožňují tak dosáhnout úspor z rozsahu, neboť stejná kapacita sítí dokáže uspokojit větší množství lidí pokud se zvýší hustota obyvatel, sociální sítě rostou supralineárně ($\beta > 1$) a pokud se zvýší počet obyvatel, tak se nadproporčně zvýší intenzita a četnost sociálních jevů a interakcí ať už pozitivních (počet podávaných patentů) tak i negativních (kriminalita) (Bettencourt et al. 2007, Arbesman et al., 2009)

2.4 Malthusiánsko-Darwinistická dynamika

Ačkoli se zmínka o Malthusiánsko-Darwinistické dynamice objevují již ve výše zmíněném Brown et al. (2011), vysvětlena je až v eponymním článku o dva roky později. (Nekola et al. 2013) První část této dynamiky, jež je pojmenována podle Thomase Malthuse, si podle jejích autorů bere z jeho práce poznatek, že lidská společnost má tendenci růst geometrickou řadou, dokud nenarazí na limity prostředí, poté musí nevyhnutelně dojít k snížení populace, ať už poklesem porodnosti, nebo zvýšením úmrtnosti.

Tato dynamika vedla Darwina k zjištění, že kvůli nadprodukci potomků v přírodě dochází k tomu, že pouze ti, kteří jsou lépe přizpůsobeni prostředí než ostatní jedinci toho druhu, jsou schopni se rozmnožit i do dalších generací. Dochází tak k postupnému přizpůsobování se prostředí organismy, nebo vzniku evolučních novinek v biologické či kulturní evoluci.

Malthusiánská dynamika tak vede k neustálému zvyšování populací až na hranici limitů prostředí, Darwinistická dynamika má za následek neustálé posouvání těchto limitů. Takovéto posouvání však nemůže trvat věčně - podle Nekola et al. je „logicky, fyzikálně i biologicky nemožné, aby v omezeném prostředí probíhal exponenciální růst neomezeně“. Nekola et al. staví do opozice vůči

tomuto postoji o omezenosti zdrojů v konečném vesmíru zastávaných Malthusiány tzv. kornukopiány (z latinského *cornu copiae*, roh hojnosti), kteří naopak tvrdí, že žádné takovéto tvrdé limity rozvoje neexistují.

2.5 Thomas Malthus a principy populace

Thomas Malthus představuje patrně ekonoma který je nejvíce znám mezi biology. Proslulostí mezi nimi se mu dostalo díky roli kterou mu oba otcové evoluční teorie -Charles Darwin a Alfred Russel Wallace - přisoudili při jejím formování. Pro oba se stal klíčovým jeho poznatek o limitaci populace dostupnými zdroji a o převaze přírůstku populace nad přírůstkem dostupnosti zdrojů.

Malthusovo dílo ovšem určitě muselo zahrnovat i něco jiného než tuto jednu větu. V čem spočívalo? Odhlédneme-li od jeho práce o pracovní teorii hodnoty, Malthusův *An Essay on the Principle of Population*, původně publikovaný pod pseudonymem, představuje krom výše zmíněného i jeho vklad demografii, biologii a dalším vědám

Klíčovým je už dříve zmíněný rozdíl mezi růstem množství prostředků k obživě (které podle něj roste *přinejlepším* lineárně, každá generace je schopná zvýšit zdroje maximálně o tolik co generace předchozí) a růstem populace, který je hnán biologickým pudem a morální nestřídmostí a vede k zdvojnásobení populace která má dostatek zdrojů každých pětadvacet let (což je údaj který je od Malthuse mnohokrát citován, například právě Darwinem, ale jedná se o údaj ke kterému Malthus neměl žádné empirické podklady (Hunt 2015)).

Růst populace je ale omezován jednak pozitivními omezeními které snižují populaci přímo pokud přesáhne možnosti obživy a patří mezi ně nemoci, hladomor a násilí a druhak negativními omezeními, které snižují porodnost ještě před tím než dojde k nějakému překročení limitů a mezi které Malthus řadil oddalování

věku svatby a sexuální střídmost. Přičemž v rozdílných vrstvách populace se projevují rozdílné omezení - chudé vrstvy (které jsou podle Malthuse chudé, protože žijí v hříchu a nejsou schopné morálního sebeomezení) trpí pozitivními druhy omezení, zatímco majetné vrstvy jsou schopny se sami omezit.

Především je nutno zdůraznit jednu skutečnost co se týče obou druhů růstu - jak populace tak dostupných prostředků - Malthus považoval oba dva za přírodní zákonitosti které by měly kdy skončit. Populace by se v případě neomezených zdrojů pokaždé snažila zdvojnásobit co čtvrstoletí a zdroje by každou generaci vrostly o tolik jako v té předchozí. A skutečně se jedná o každou generaci - Malthus sám neveril že by existovalo nějaké maximální možné množství zdrojů které je možné vyzískat. Jeho slovy: *"No limits whatever are placed to the productions of the earth; they may increase for ever and be greater than any assignable quantity."* (Malthus 1809)

3. Data a metody

3.1 Data

Použil jsem veřejně přístupná data o 215 zemích z let 1980–2011. Za účelem poměřitelnosti výsledků jsem se snažil využít stejná data jako Brown et al. (2001), kde to bylo možné.

Data o využití energie v ekonomice jsem čerpal z nedávno zveřejněných údajů Energetické informační agentury (Energy Information Administration, EIA, eia.gov) ministerstva energetiky Spojených států amerických stejně jako Brown et al. (2001). Ekonomická a demografická data o hrubém domácím produktu, hrubé přidané hodnotě v jednotlivých národních ekonomikách i jejich jednotlivých sektorech, porodnosti, hustotě zalidnění a míře urbanizace, stejně jako o průměrných teplotách různých územních celků, musela být čerpána z databáze World Development Indicators Světové banky (World Bank, WB, worldbank.org), protože World Resources Institute již neposkytuje data o HDP, která byla použita v původní studii. Ze stejného důvodu jsem musel jako zdroj historický dat o spotřebě kalorií v jednotlivých zemích použít databáze Organizace pro výživu a zemědělství (UN Food and Agriculture Organization, FAO, fao.org)

Energetická intenzita ekonomiky je stejně jako v Brown et al. (2011) součtem využití extrametabolické a metabolické energie per capita přvedené na watt. Spotřebovaná primární energie na hlavu je součtem spotřebované energie z fosilních paliv a biomasy v daném roce a elektřiny vyrobené plus (či minus) její slado (Tedy rozdíl mezi jejím exportem a importem) v daném roce per capita. Metabolická energie per capita je kalorická spotřeba získaná ze zdrojů FAO (FAO 2012) v daném roce pro roky 1990–2008. Pro roky před rokem 1990 jsem použil data z roku 1990, pro roky po roce 2008 jsem použil data z roku 2008.

V celém textu používám výraz „Energetická intenzita

ekonomiky" pro parametr, který Brown et al. (2011) nazývají „Spotřebovaná energie per capita“, ačkoli tento termín není technicky správný, protože spotřeba energie se měří v joulech nebo kaloriích a označuje tak jinou fyzikální veličinu, než která se pro měření metabolismu (ve watttech) používá.

Ekonomické ukazatele jsou uváděny v amerických dolarech. Všechny údaje jsou přepočítány na cenovou hladinu roku 2005 (WB 2015).

Odchylku od ideální pracovní teploty jsem počítal jako rozdíl mezi průměrnou roční teplotou daného státu nebo území získanou z Climate Change Knowledge Portal (<http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm>) pomocí balíku rWBClimate verze 0.1.3 a optimální pracovní teplotou 21°C (Lan et al. 2009, Lan et al. 2011).

3.2 Metody

Analýza byla provedena v programu RStudio verze 0.98.1102. Nejdříve jsem zkontroloval, zda dokáží zreplikovat původní studii a zda tedy rovnice $E \propto G^{3/4}$ dobře popisuje vztah hrubým mezi domácím produktem a energetickou intenzitou ekonomiky i v mých datech. Zlogaritmované hodnoty energetické intenzity ekonomiky a její velikosti byly proloženy lineární regresí. Sklon výsledné přímky se velmi průkazně blížil hodnotě $\frac{3}{4}$, přistoupil jsem tedy k dalším analýzám.

Pro lineární regresí jsem použil metodu nejmenších čtverců, neměl jsem důvod předpokládat že se budou hodnoty na jednotlivých osách zatíženy zásadně odlišnou chybou. Vzhledem k množství jednotlivých pozorování které jsem použil jsem nemohl pro ověření dalších předpokladů metody nejmenších čtverců použít parametrické testy, jako je Breuch Paganův test pro heteroskedasticitu či

Shapiro-Wilkův či Kolmogorovův-Smirnovův test pro normalitu, musel jsem se tedy uchýlit k ověření heteroskedasticity a normality pomocí diagnostických grafů. Ačkoli jejich výsledky vypadaly přesvědčivě, rozhodl jsem se předpoklady zvolené lineární regrese ověřit pomocí MM-robustní regrese. Ta ale přinesla jen minimální změny v rovnici přímky a standardní chybě, podobně jako nelineární model, zůstal jsem tedy u metody nejmenších čtverců.

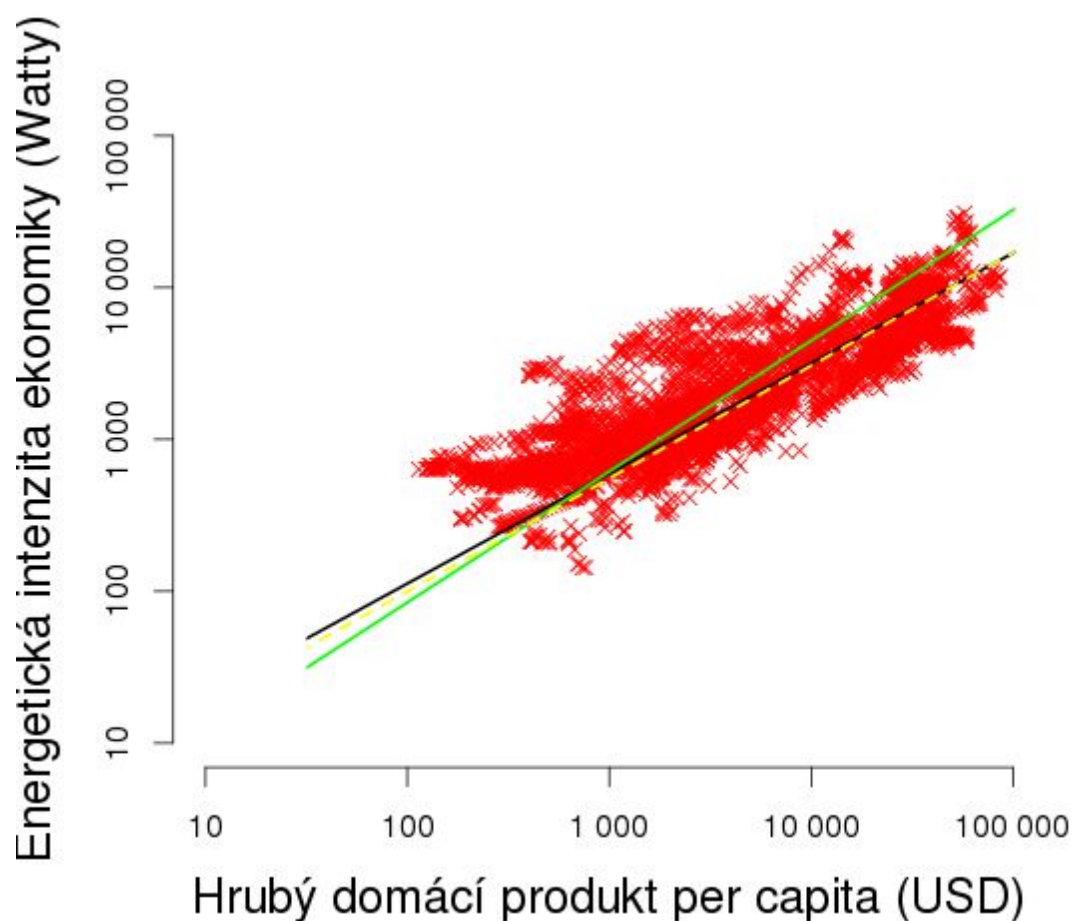
V žádné z provedených lineárních testů se nenašly vlivné body překračující Cookovu vzdálenost a pouze závislost mezi HPH v zemědělství a EIE zobrazená na Obr. 5 obsahovala šest vlivných bodů podle Bonferroniho testu. Durbin-Watsonova statistika neodhalila žádné autokorlace.

Abych mohl porovnat závislosti mezi energetickou intenzitou jednotlivých sektorů ekonomiky a jejich velikostí, musel jsem kvůli nedostatku dat o HDP produkovaném v různých sektorech ekonomiky nebo o energii v nich spotřebované, použít data o hrubé přidané hodnotě v jednotlivých sektorech ekonomiky per capita a stejná data o energetické intenzitě ekonomiky jako v předchozím případě. Abych se ujistil, že hrubá přidaná hodnota (která se rovná hrubému domácímu produktu plus dotacím minus daním (Marshall 2009)) je srovnatelným parametrem s hrubým domácím produktem, sečetl jsem hrubou přidanou hodnotu ze všech sektorů a tento součet jsem po zlogaritmování použil stejně jako HDP v předchozím případě. Sklon přímky opět vyšel v intervalu odpovídající 95% konfidenčnímu intervalu u Brown et al. 2011. Pokračoval jsem tedy dále a porovnal sklon přímky lineární regrese logaritmů přidaných hodnot v jednotlivých sektorech s logaritmem energetické intenzity ekonomiky.

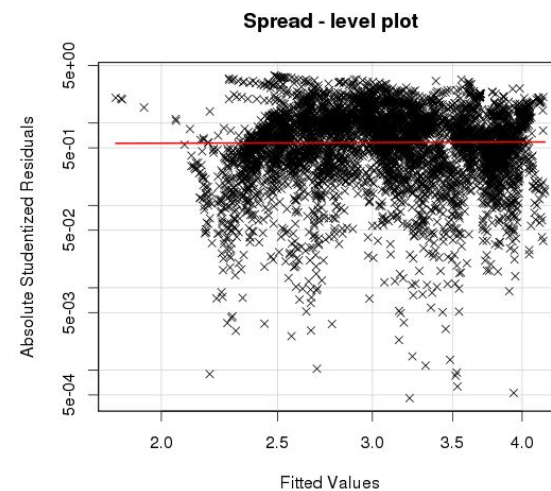
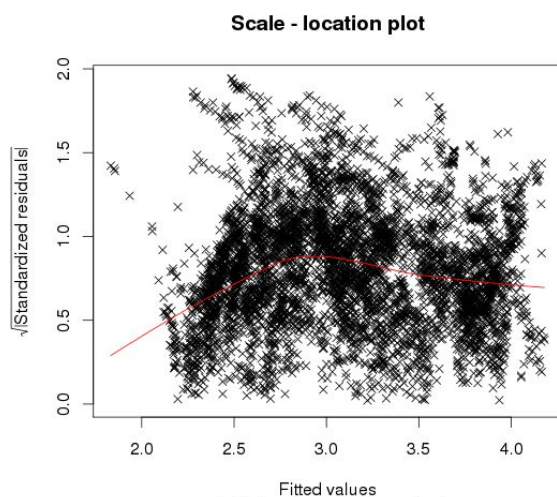
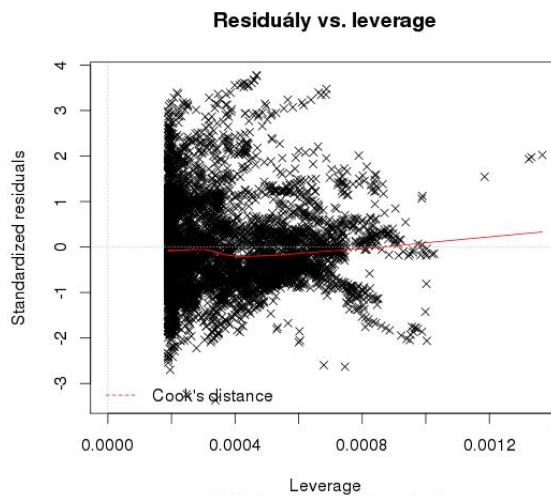
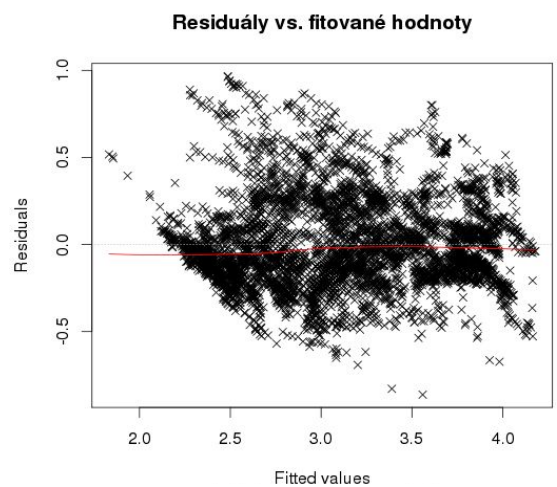
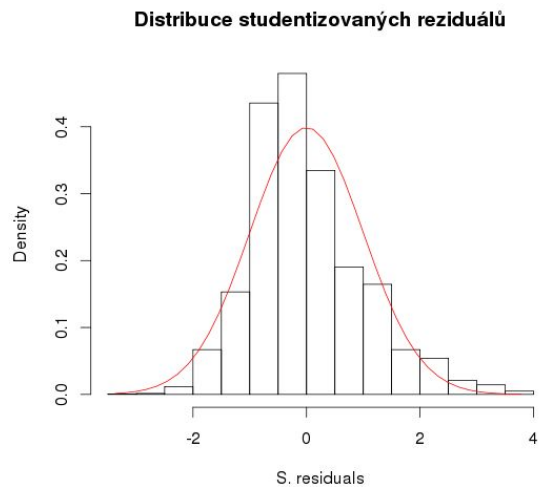
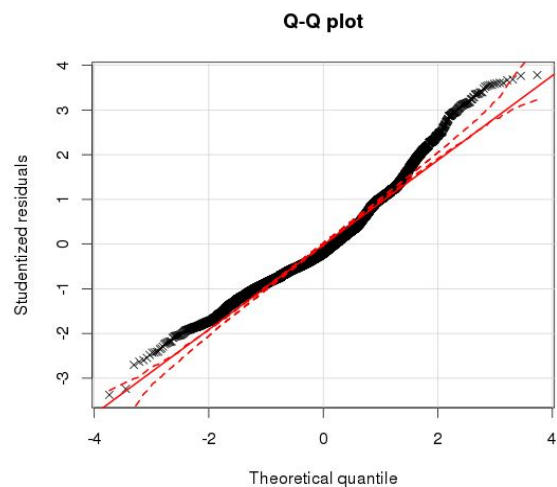
V dalších částech jsem se věnoval analýze vztahů mezi jednotlivými

ekonomickými, demografickými a dalšími veličinami. Napřed jsem podrobil soubor dat ordinační analýze. Aby ji bylo možno provést, musel jsem doplnit chybějící hodnoty tam, kde to bylo možné. Vzhledem k relativně velkému množství chybějících hodnot jsem místo jejich nahrazení průměrnými hodnotami zvolil jejich doplnění metodou vícenásobného vložení (multiple imputation) (Honaker & King 2010) pro kterou jsem využil balík Amelia verze 1.7.4. I přes to bylo nutno některé státy a území z analýzy vyřadit kvůli minimálnímu množství pozorování, nakonec jsem použil 165 zemí. Po doplnění chybějících hodnot (34 % souboru) jsem provedl detrendovanou korespondenční analýzu (Detrended correspondence analysis, DCA) pomocí balíku vegan verze 2.2-1 a změřil hodnotu první DCA osy. Ta vyšla < 3 , data tedy byla homogenní (Lepš & Šmilauer, 2003) a já mohl k jejich analýze využít analýzu primárních komponent (PCA, Principal component analysis).

4. Výsledky



Obr. 3 Závislost energetické intenzity ekonomiky na hrubém domácím produktu vynesené na logaritmických osách. Černou čarou je vyznačena lineární regrese s rovnicí přímky $y=0.6+x*0.73$ s $r^2=0.8$, korelace je pro ni signifikantní $p<0.001$. Žlutou přerušovanou čarou je vyznačena rovnice robustní MM-regrese s rovnicí přímky $y=0.51+x*0.74$ s $r^2=0.84$, korelace je pro ni signifikantní $p<0.001$. Zelená čára představuje nelineární regresi s rovnicí přímky $y=0.2+x^{0.86}$, korelace je pro ni také signifikantní $p<0.001$.



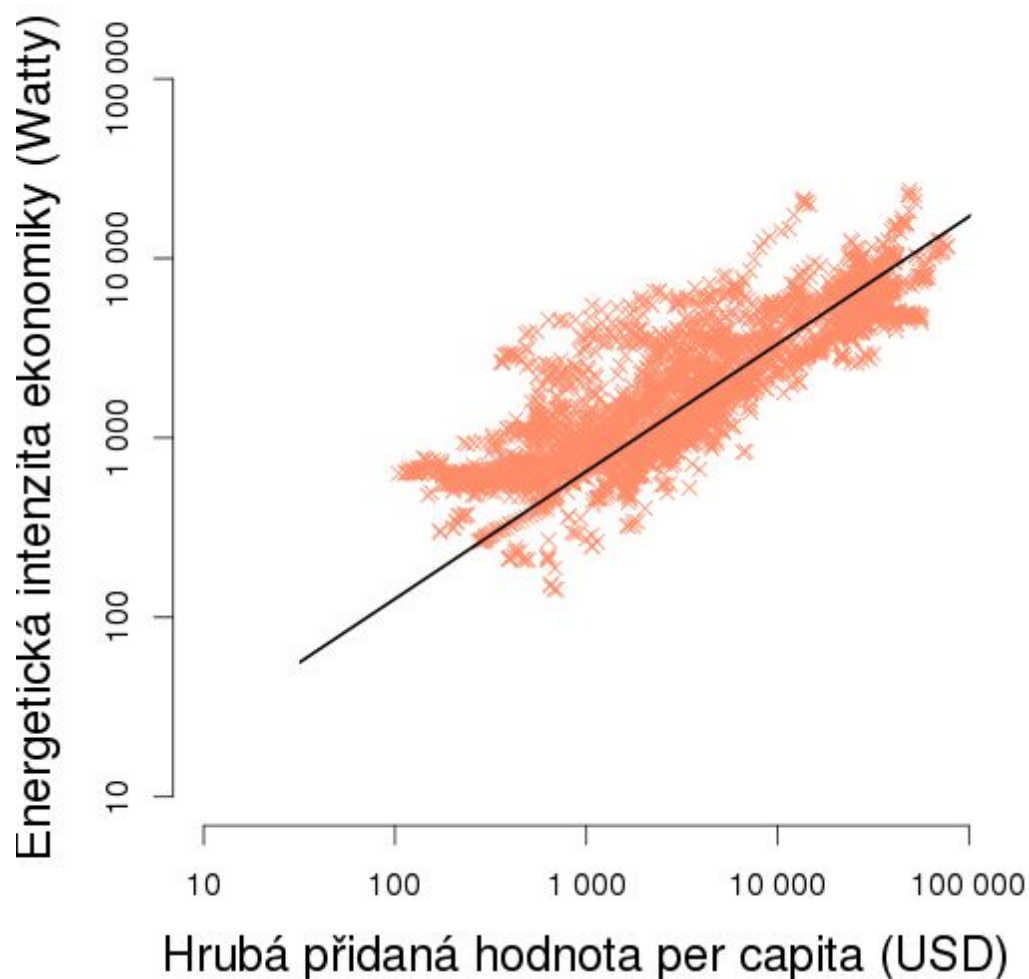
Obr. 3.1-3.6 Diagnostické grafy pro lineární regresi z Obr. 3

Podle vzoru Brown et al. 2011 jsem se zaměřil na vztah mezi HDP a EIE. Exponent rovnice vložené přímky lineární regrese 0.73 (95% konfidenční interval 0.72-0.74) je velmi blízko kanonické hodnotě 0.75 MTE pro škálování rychlosti metabolismu a tělesné hmotnosti a je v rozmezí 95% konfidenčního intervalu uváděného tamtéž 0.69-0.82.

Ačkoli diagnostické grafy (Obr 3.1-3.6) této lineární regrese nepoukazovaly na nějaké zásadní porušení jejích předpokladů, nemohl jsem jej kvůli nemožnosti provést parametrické testy normality a heteroskedasticity, vzhledem k příliš vysokému množství použitých pozorování jednoduše zavrhnout. Provedl jsem tedy ještě MM-robustní lineární regresi, oproti původně použité metodě nejmenších čtverců však došlo jen k minimálním změnám v exponentu přímky a k změně standardní chyby na třetím desetinném místě. Robustní regrese byla použita i u dalších závislostí, vždy s podobně zanetbatelnými změnami a to i v případě že diagnostické grafy napovídaly větší porušení předpokladů než v tomto případě, proto jsem se rozhodl považovat předpoklady použití metody nejmenších čtverců za splněné.

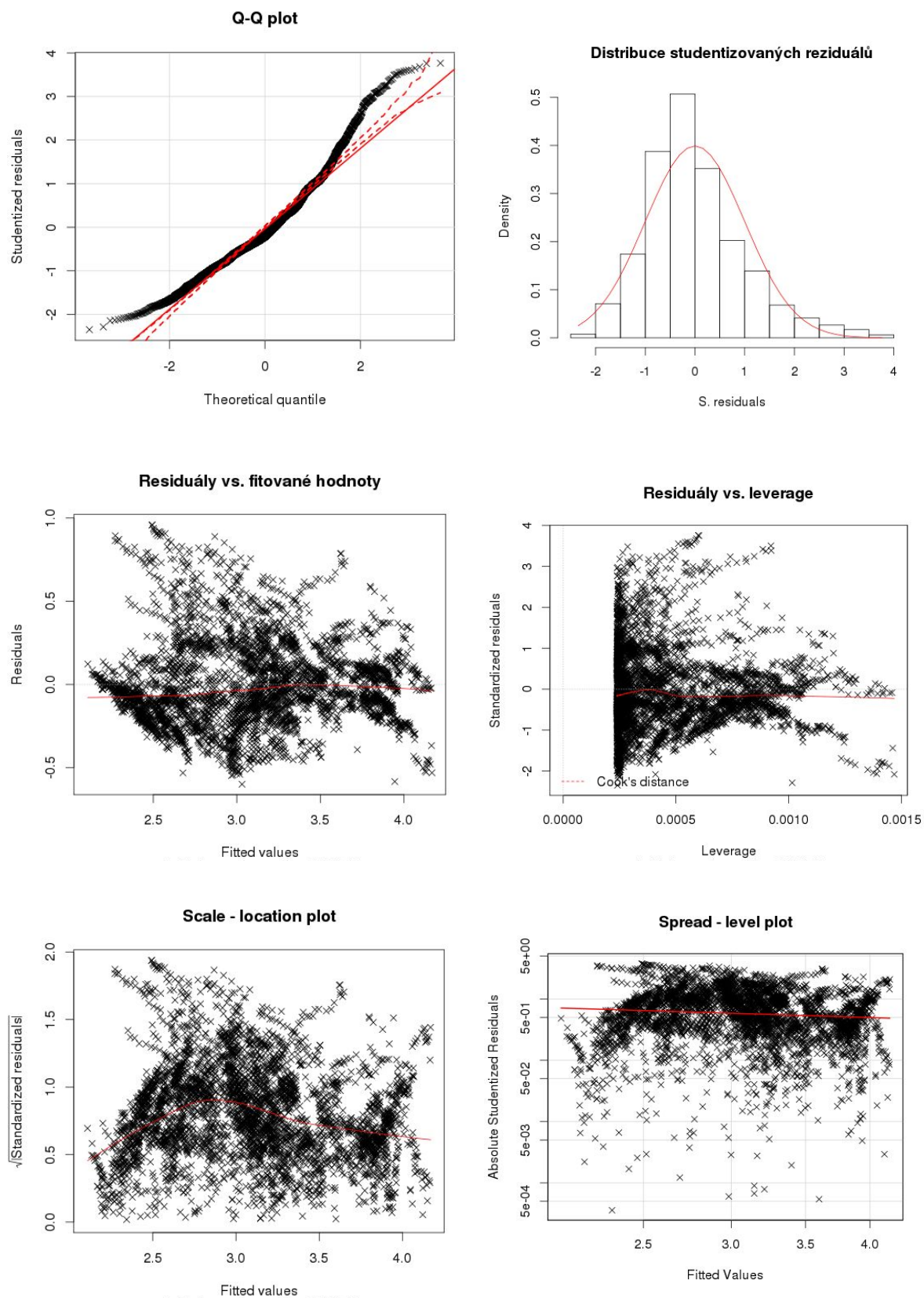
Dalším možným alternativním postupem by bylo použít nelineární regresi místo regrese lineární. Ta je zde pro ilustraci vynesena, ale její použití naráží na několik problémů. Prvním je, že Metabolická teorie biologie a na ni navazující práce používají lineární regresi v log-log prostoru a případné nelineární regresi tak chybí teoretické podchycení, nehledě na obecné interpretační problémy toho, jakou závislost vlastně nelineární regrese v log-log prostoru představuje. A v neposlední řadě použití nelineární závislosti nepředstavuje v tomto případě žádný zisk, standardní chyba oproti lineární regresi dokonce na čtvrtém desetinném místě vzroste.

4.1 Hrubá přidaná hodnota a energetická intenzita ekonomiky

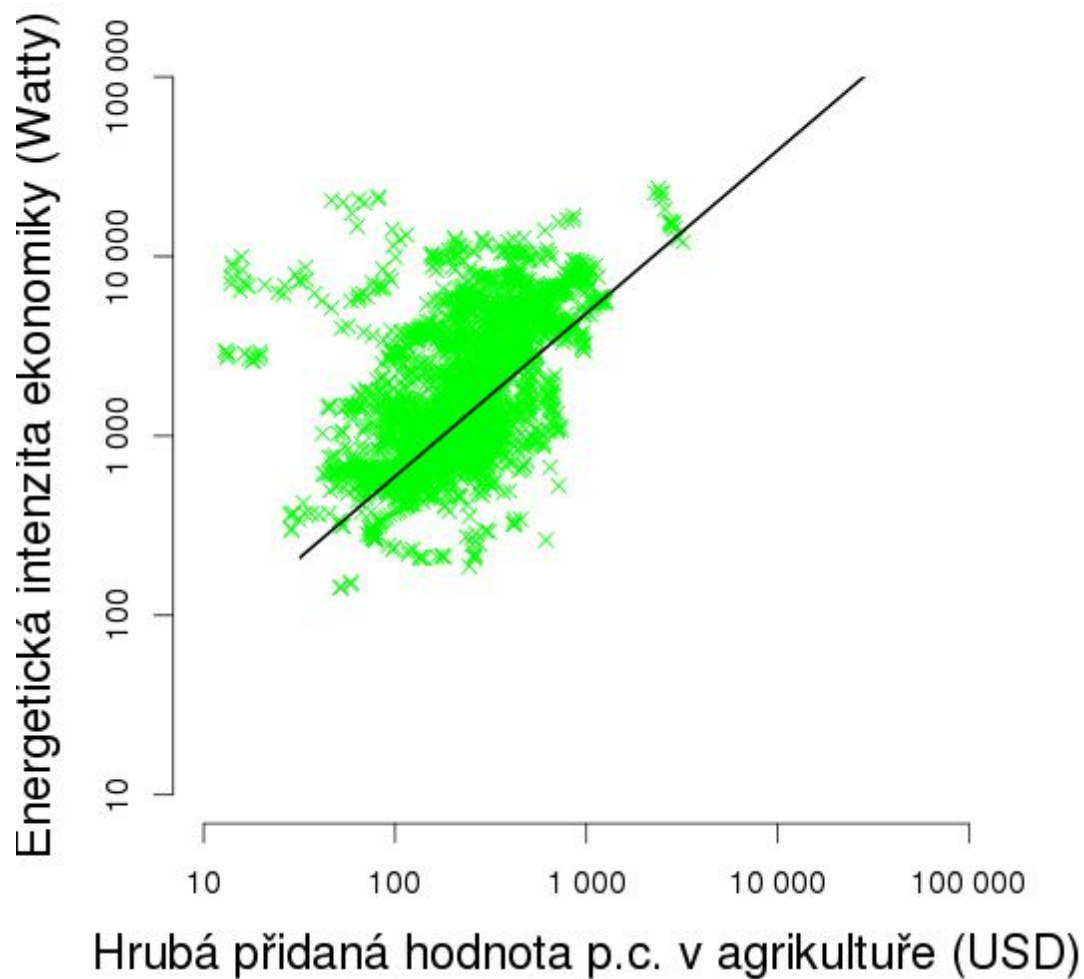


Obr. 4 Závislost energetické intenzity ekonomiky na hrubém přidané hodnotě vynesené na logaritmických osách. Lineární regrese má rovnici přímky $y=0.66+x*0.71$ s $r^2=0.74$, korelace je signifikantní $p<0.001$.

Při použití hrubé přidané hodnoty místo hrubého domácího produktu dojde k poklesu exponentu přímky regrese na 0.71 (95% konfidenční interval 0.70-0.72), ten se ale stále nachází v rozmezí 0.69-0.82 udávaný pro exponent rovnice vztahu HDP a EIE v Brown et al. 2011.

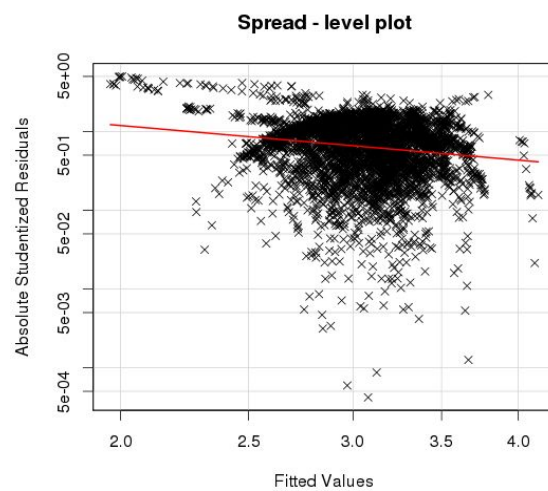
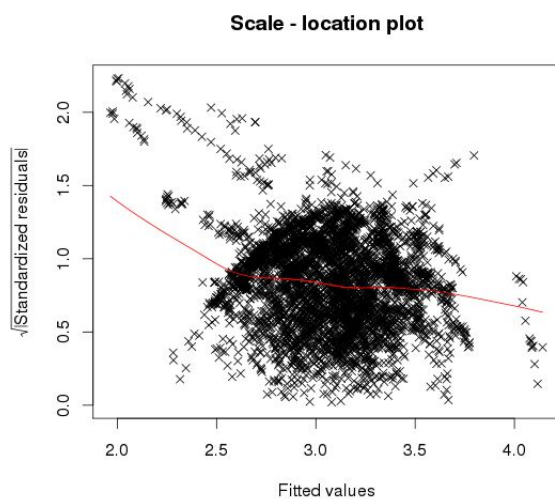
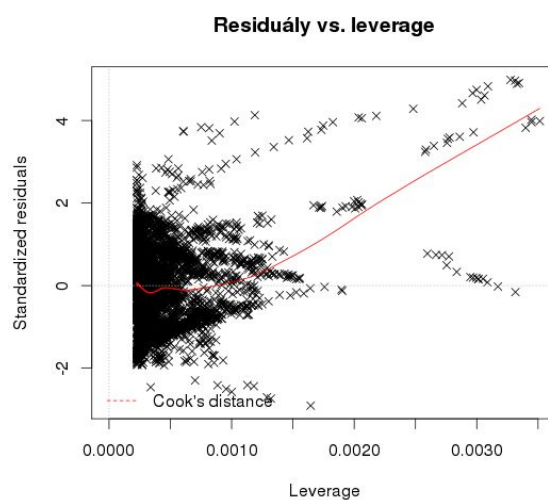
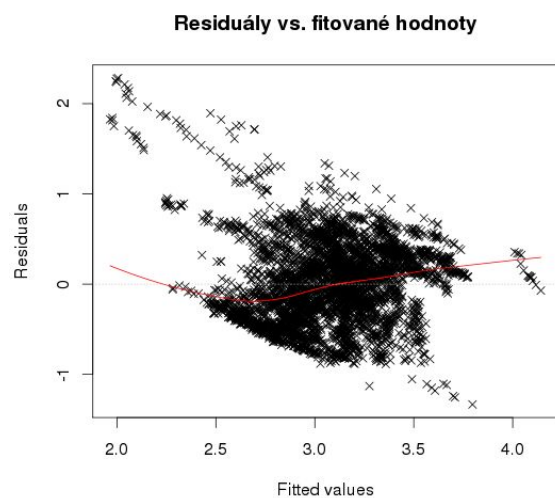
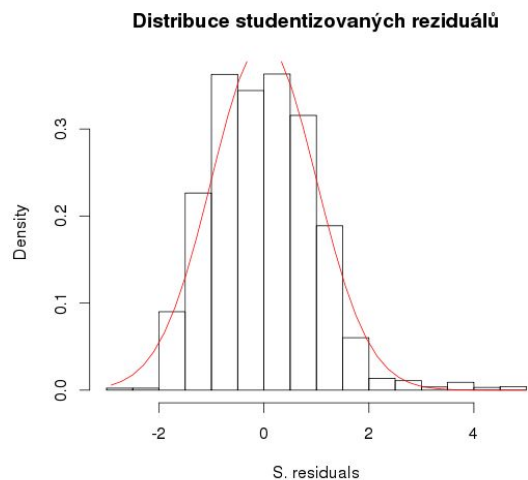
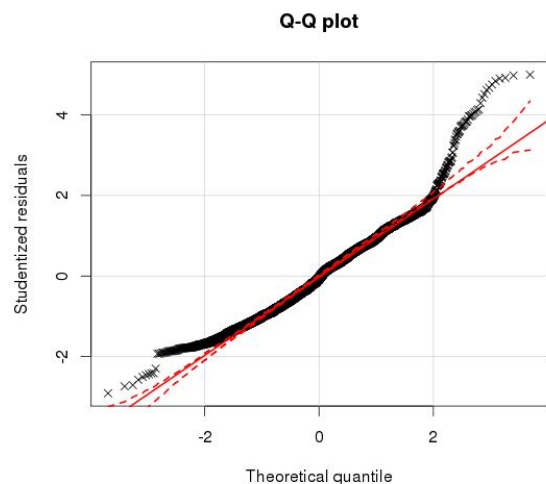


Obr. 4.1–4.6 Diagnostické grafy pro lineární regresi z Obr. 4

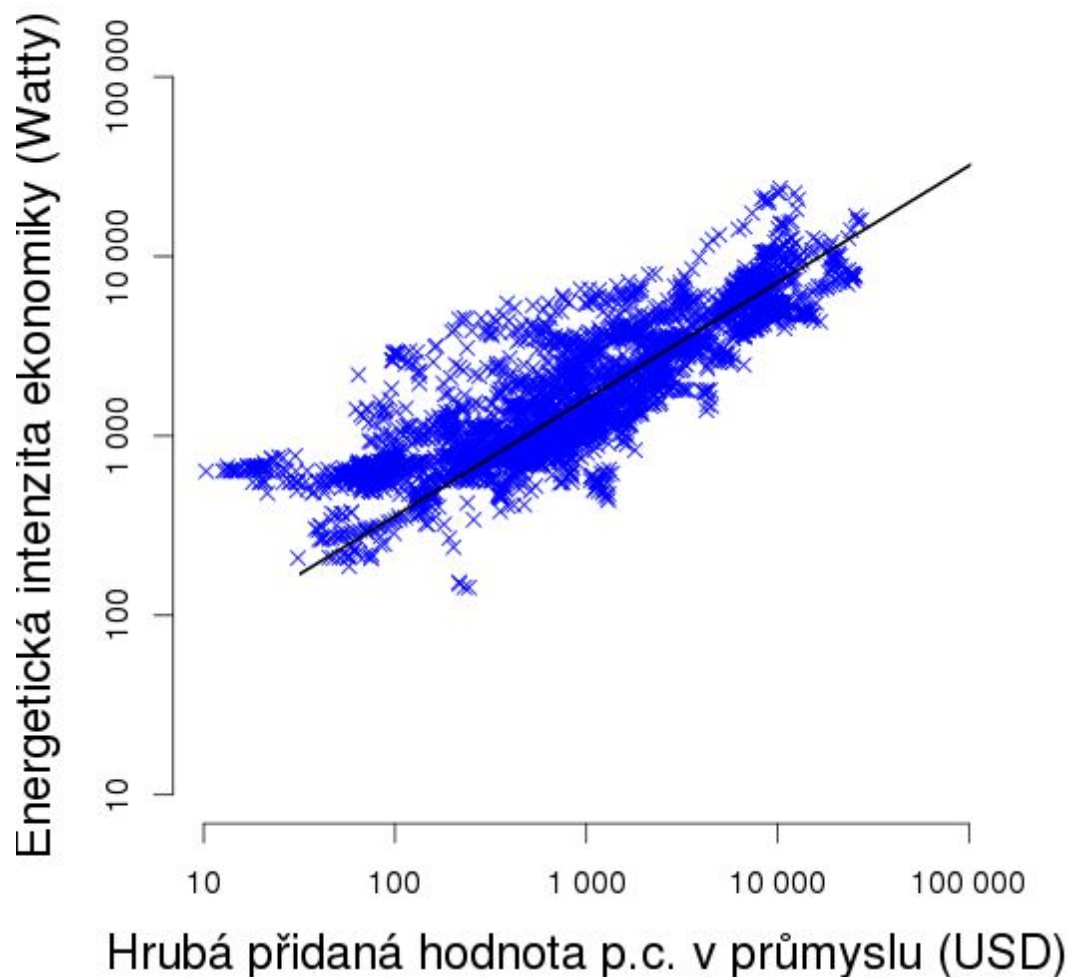


Obr. 5 Závislost energetické intenzity ekonomiky na hrubé přidané hodnotě per capita vynesené na logaritmických osách. Lineární regrese má rovnici přímky $y=0.95+x*0.91$ a $r^2=0.30$, korelace je signifikantní $p<0.001$.

Vztah mezi hrubou přidanou hodnotou v agrikultuře na osobu a celkovou energetickou intenzitou ekonomiky následuje takřka lineární závislost (95 % konfidenční interval exponentu je 0.87-0.95) ačkoli vzhledem k velmi nízkému r^2 je hodnota exponentu málo vypovídající a nespolehlivá.

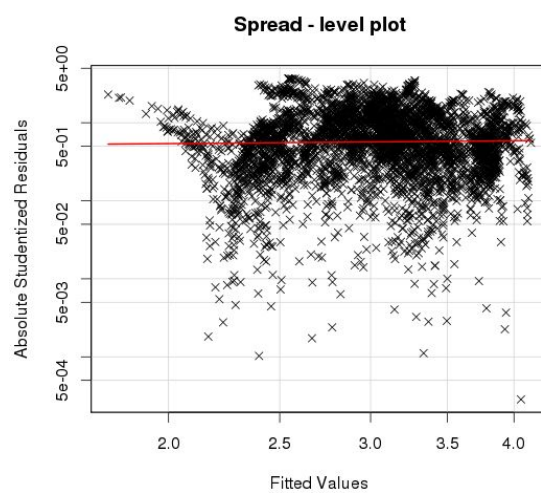
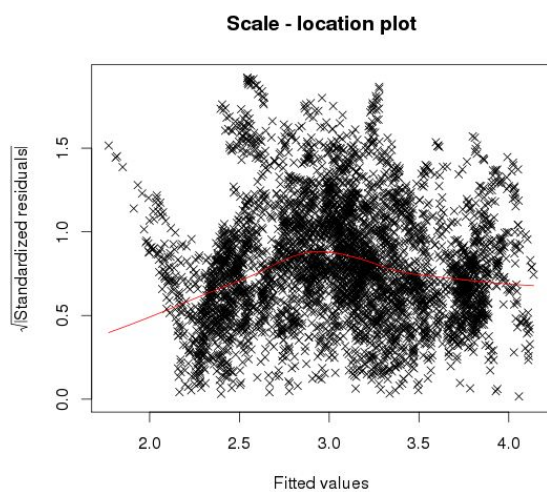
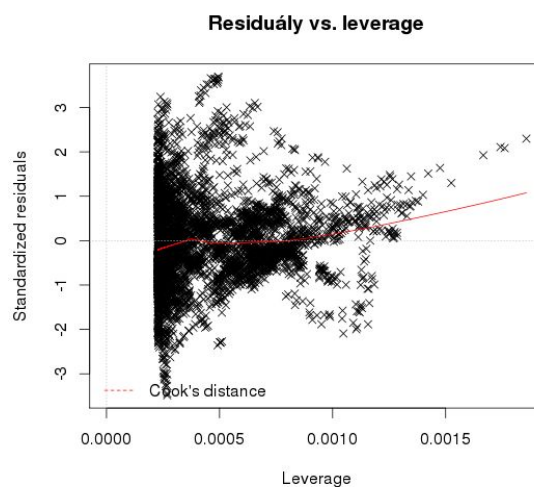
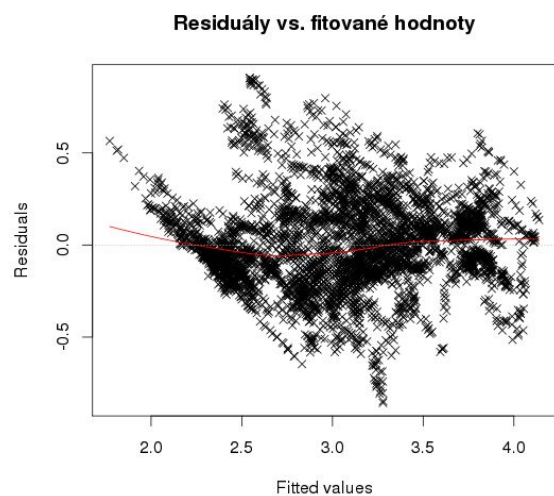
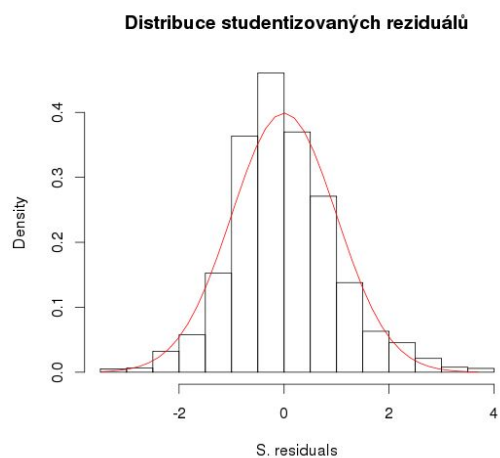
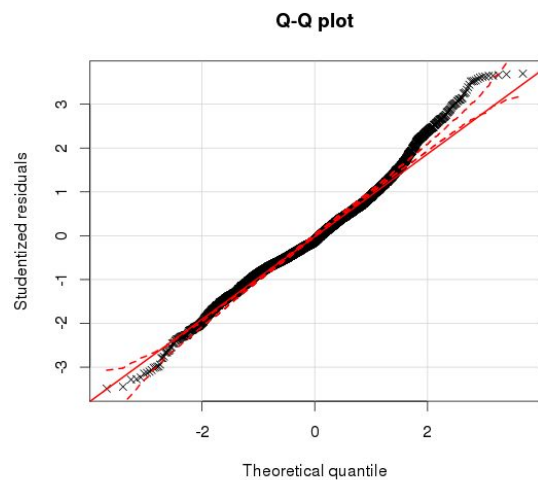


Obr. 5.1–5.6 Diagnostické grafy pro lineární regresi z Obr. 5

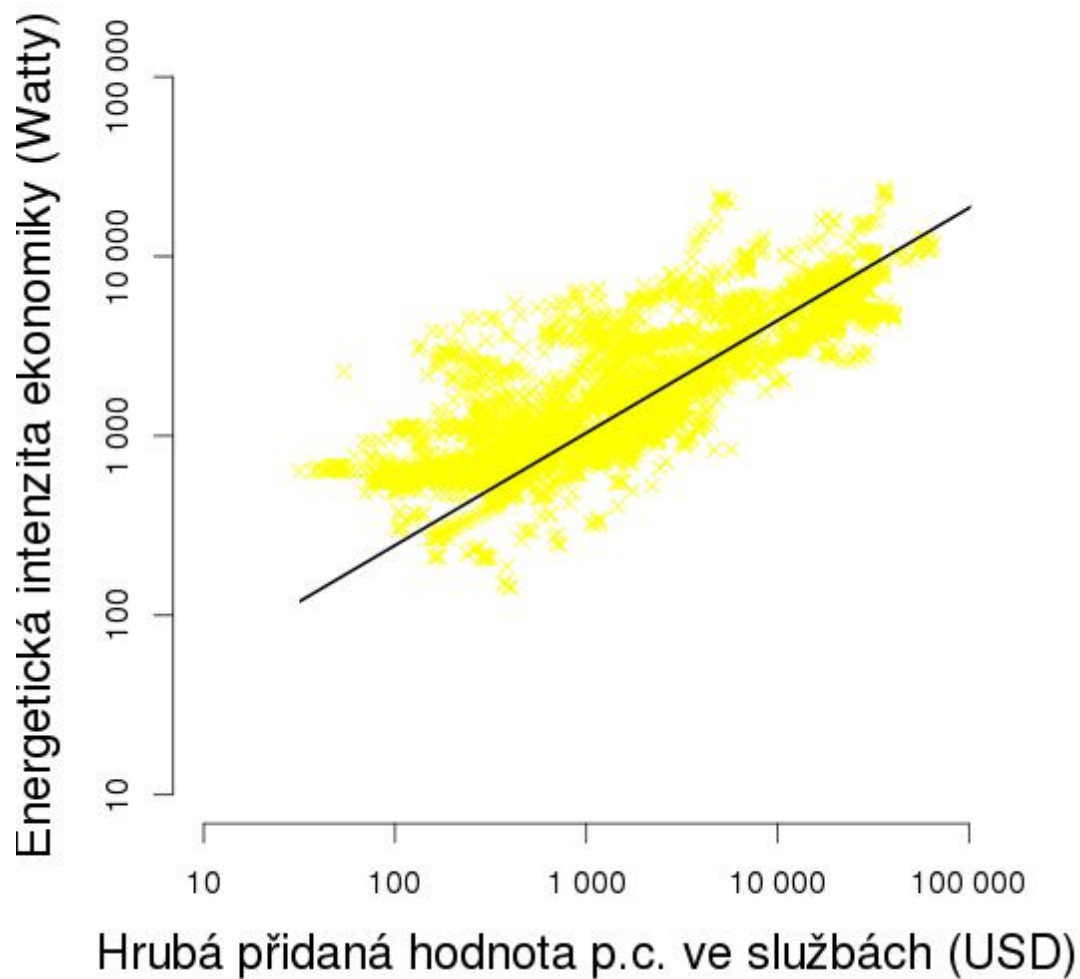


Obr. 6 Závislost energetické intenzity ekonomiky na hrubé přidané hodnotě v sektoru průmyslu. Lineární regrese má rovnici přímky $y = 1.25 + x \cdot 0.65$ s $r^2 = 0.80$, korelace je signifikantní $p < 0.001$.

Ačkoli by se mohlo zdát že exponent lineární regrese je blízký hodnotě 0.66 (95% konfidenční interval je 0.65-0.67) a tedy dalšímu z exponentů často se objevujících v MTE, nemáme důvod předpokládat že se o takovou závislost jedná, protože poměříme hrubou přidanou hodnotu jednoho sektoru ekonomiky a energetickou intenzitu ekonomiky celé, ne energetickou intenzitu daného sektoru. Jedná se ale o závislost velmi významnou, vysvětlující čtyři pětiny variability.

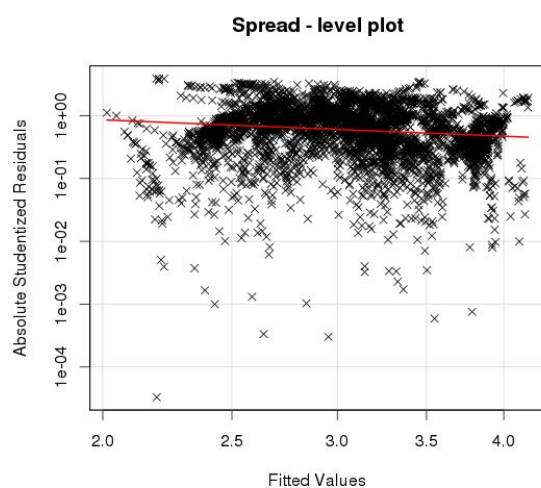
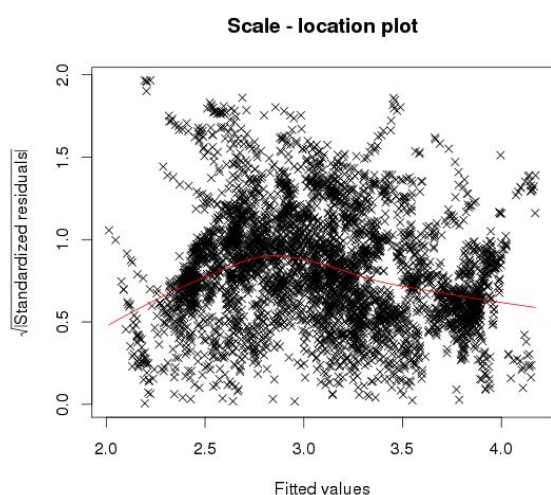
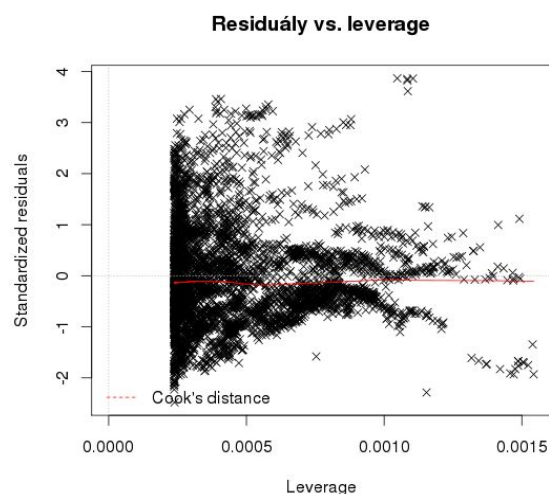
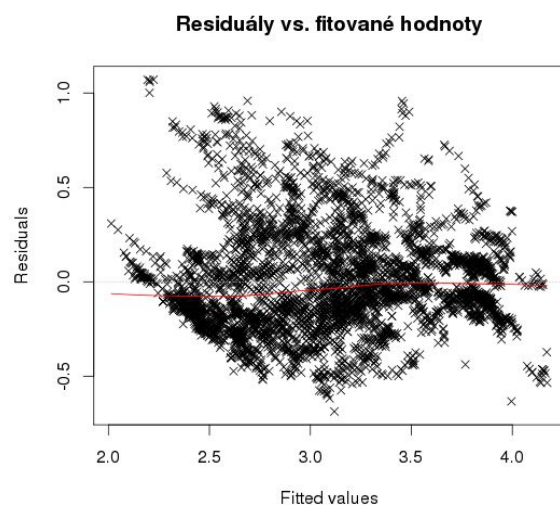
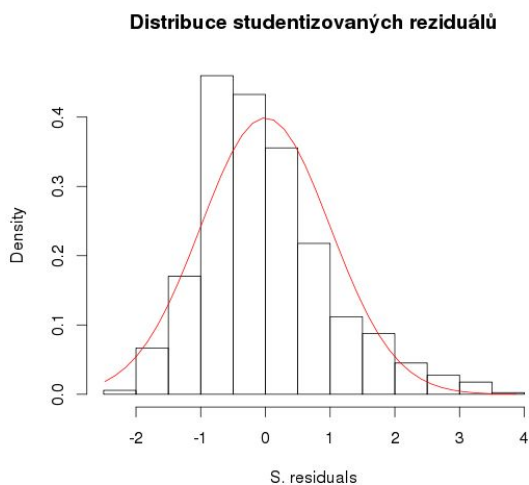
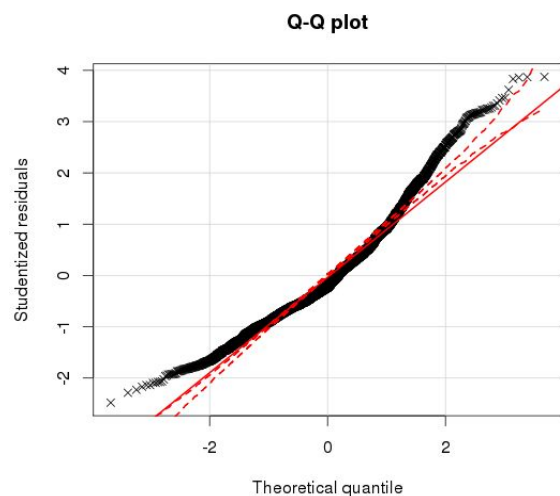


Obr. 6.1–6.6 Diagnostické grafy pro lineární regresi z Obr. 6



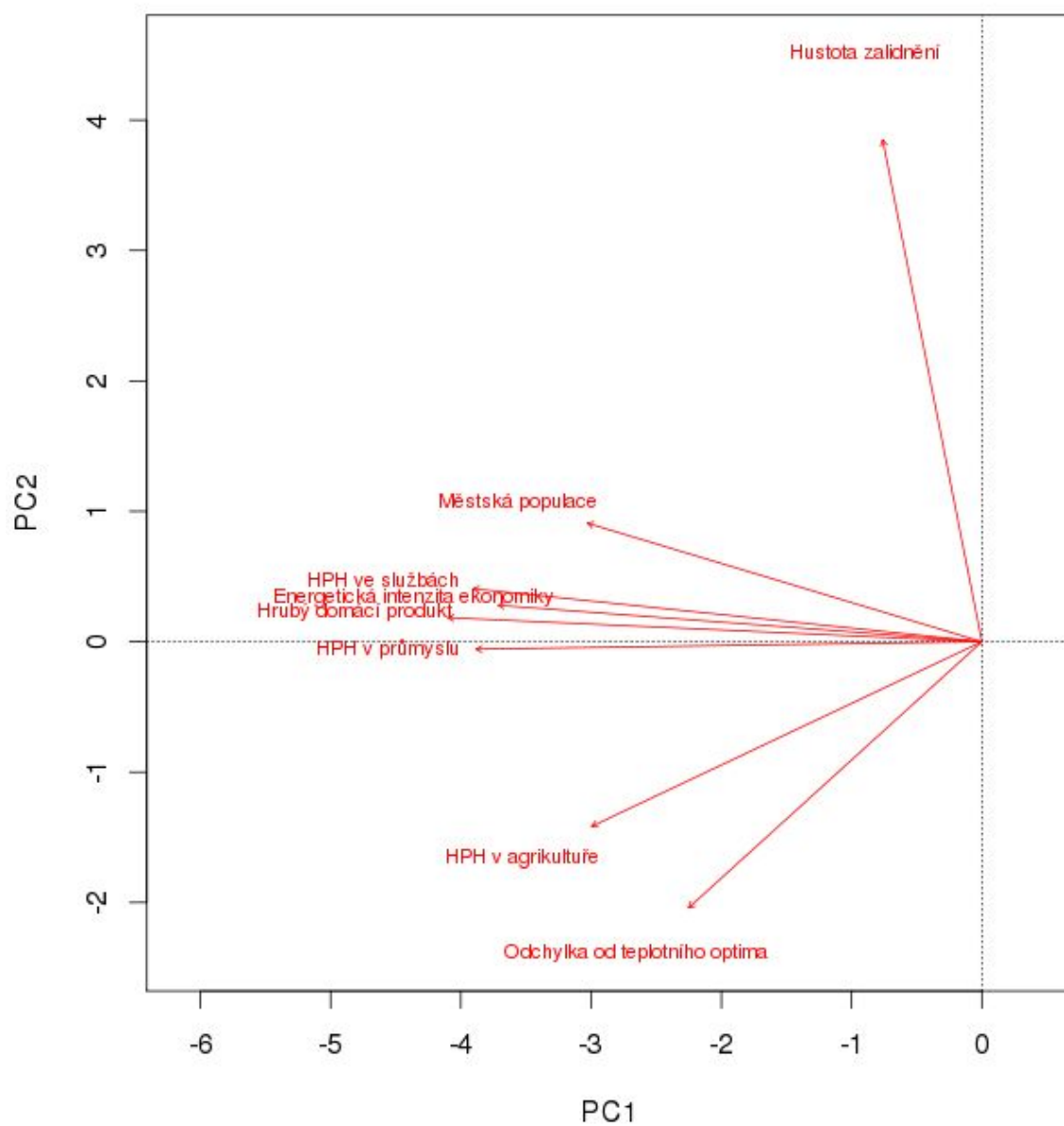
Obr. 7 Závislost energetické intenzity ekonomiky na hrubé přidané hodnotě v sektoru služeb. Lineární regrese má rovnici přímky $y=1.13+x*0.71$ s $r^2=0.74$, korelace je signifikantní $p<0.001$.

Exponent rovnice lineární regrese 0.63 (95% konfidenční interval 0.61-0.64) vztahu mezi HPH terciálního sektoru je velmi předchozímu exponentu pro sektor sekundární. Oba dva sektory škálují podobným způsobem a liší se od sektoru primárního.



Obr. 7.1-7.6 Diagnostické grafy pro lineární regresi z Obr. 7

4.2 Vícerozměrné vztahy některých socioekonomických jevů



Obr. 8 Analýza hlavních komponent demografických, makroekonomických a meteorologických dat. První osa vysvětluje 58 % variability, druhá osa 15 % variability.

Na Obr 8. můžeme vidět jak spolu některé makroekonomické a demografické jevy souvisejí. Především můžeme vidět těsnou souvislost mezi hrubým domácím produktem na obyvatele, energetickou intenzitou ekonomiky, a hrubými přidanými hodnotami per capita v oblasti průmyslu a služeb.

Dále s touto skupinou souvisí podíl městského obyvatelstva, i když volněji. To může být do jisté míry způsobeno omezenou vypovídající hodnotou kterou procento urbanizace má - viz Obr 10. Oproti tomu hustota zalidnění (sama o sobě) prakticky nesouvisí s těmito faktory intenzivního využívání energie. Na následujících dvou grafech toto ilustruji s využitím údajů o fertilitě.

Odchylka od teplotního optima se jen málo projevu na intenzivnějším využíváním energie, hypotéza, že státy existující v klimaticky nepříznivých oblastech využívají více energie se tedy nepotvrzuje.

Oproti tomu s odchylkou od teplotního minima se zdá růst hrubá přidaná hodnoty v zemědělství, které má jen volnou vazbu na HPH, což není vzhledem k výsledkům předchozí části až tak překvapivé. Ovšem redukce vícerozměrného prostoru do dvou rozměrů nezaručuje zachování vtažů mezi směnicemi a může vést ke zkreslení, neboť zobrazení přímek poblíž sebe může být jen důsledkem jejich promítnutí na plochu.

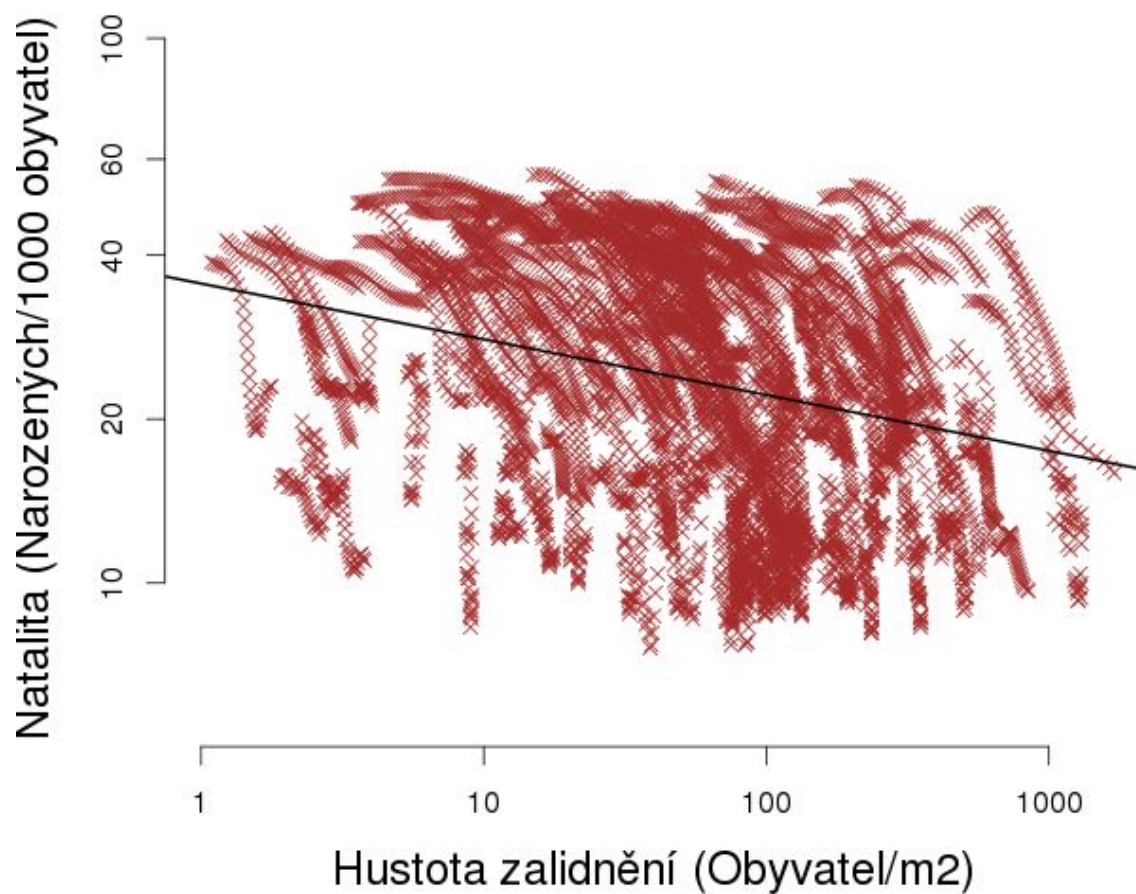
	HPH v agrikultu ře	HPH v průmysl u	HPH ve službác h	Hustota zalidně ní	Hrubý domácí produk t	Městská populac e	Odchylk a od tepl. optima	Energetic ká intezita ekonomiky
HPH v agrikultu ře	1.00	0.66	0.51	-0.01	0.12	0.08	0.16	0.10
HPH v průmyslu	0.66	1.00	0.95	0.00	0.37	0.25	0.22	0.32
HPH ve službách	0.51	0.95	1.00	0.00	0.37	0.23	0.20	0.31
Hustota zalidnění	-0.01	0.00	0.00	1.00	0.16	0.23	-0.14	0.18
HDP	0.12	0.37	0.37	0.16	1.00	0.59	0.42	0.77
Městská populace	0.08	0.25	0.23	0.23	0.59	1.00	0.28	0.56
Odchylka od teplotníh o optima	0.16	0.22	0.20	-0.14	0.42	0.28	1.00	0.39
Energetic ká intezita ekonomiky	0.10	0.32	0.31	0.18	0.77	0.56	0.39	1.00

Tabulka 1 Korelační koeficienty jednotlivých os z Obr. 8.

Vynesením korelací jednotlivých os z předchozího grafu vidíme, že některé vztahy byly opravdu náhodné, především se jedné o vztah mezi HPH v agrikultuře a odchylkou od optimální teploty, jkkoli je tento výsledek intuitivně předvídatelný.

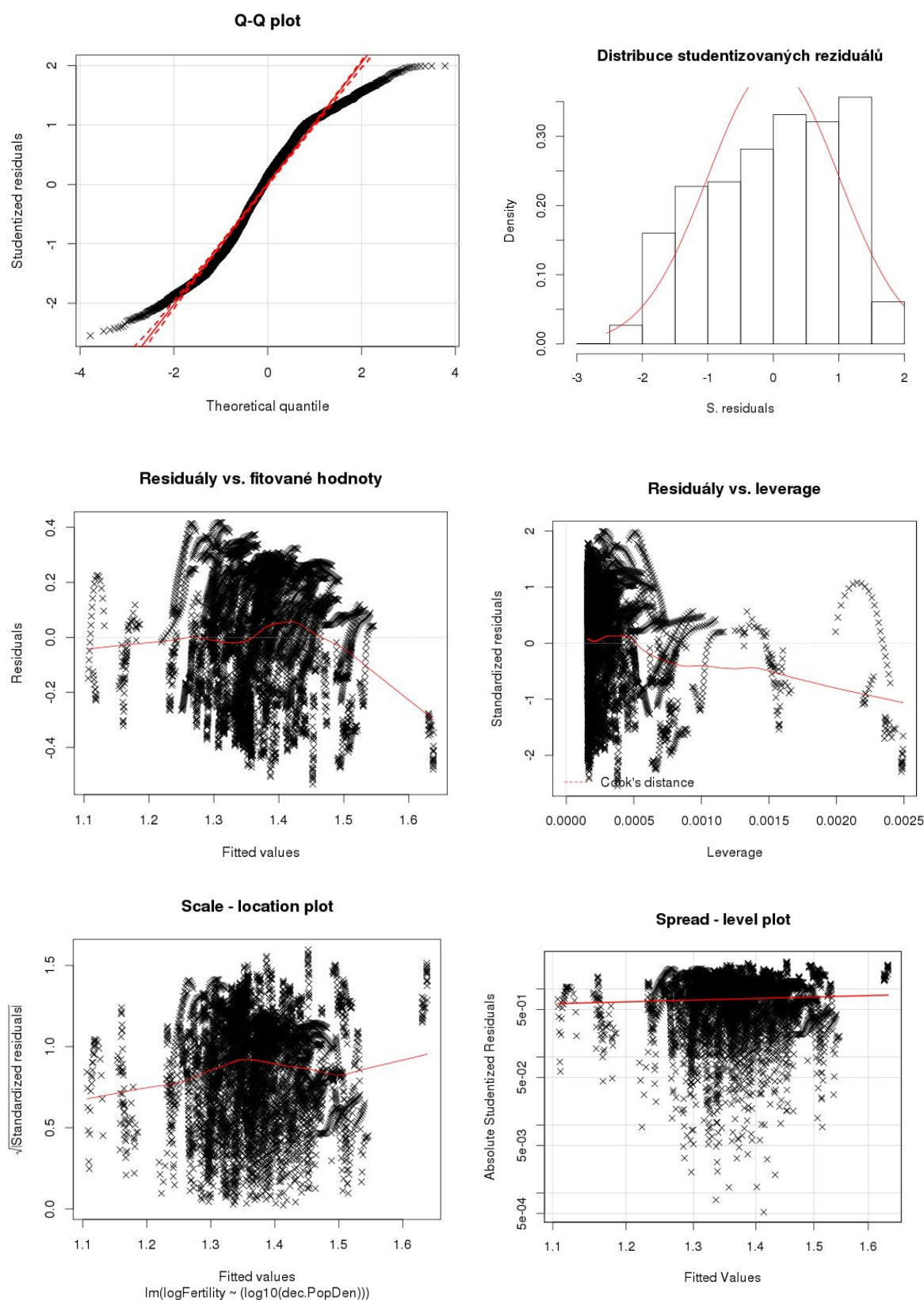
Naproti tomu se ukazuje že hustota zalidnění opravdu nesouvisí s žádným ostatním jevem a je k většině z nich prakticky mimoběžná. Oproti tomu míra urbanizace koreluje s HDP a EIE, vzájemě provázanými jevy jak vyplynulo z předchozí části.

HPH v průmyslu a ve službách spolu naopak velmi souvisejí, ovšem jejich vztah k EIE a HDP je slabší než z Obr. 8 vyplývá.

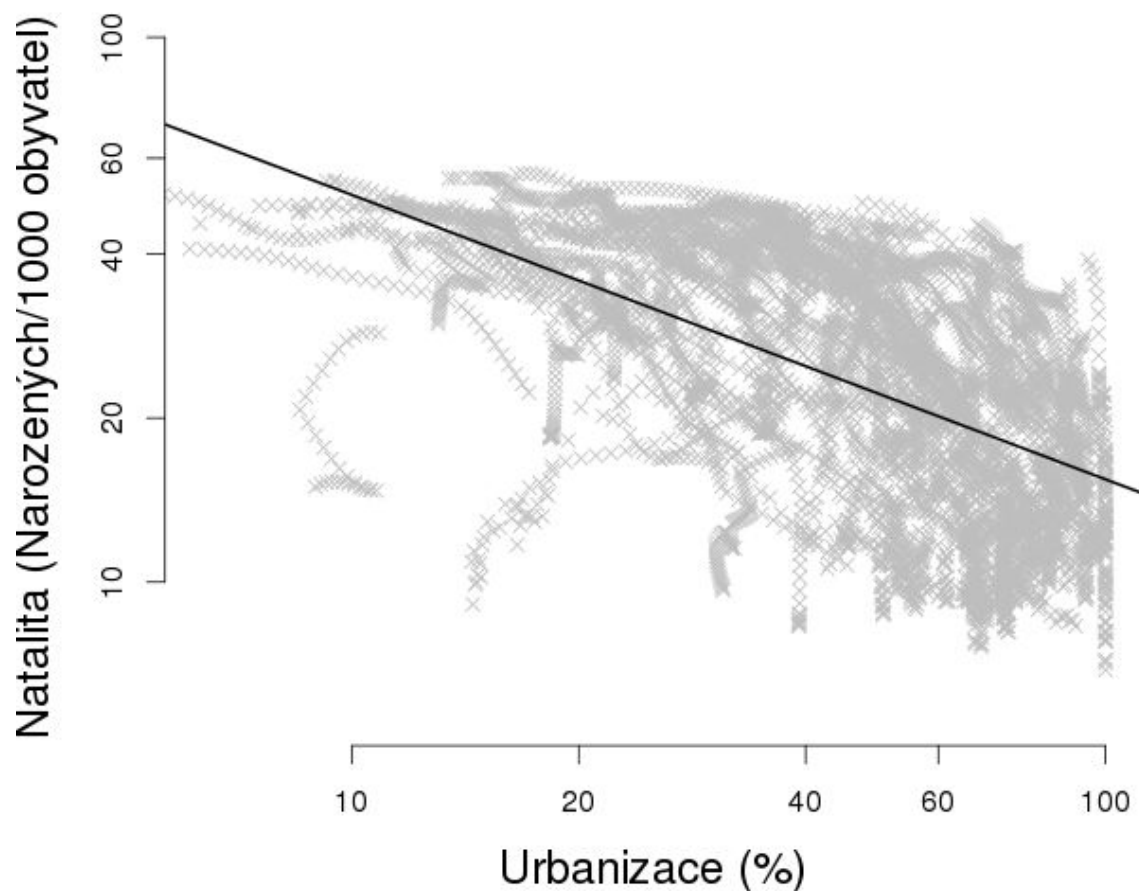


Obr. 9 Závislost natality na hustotě zalidnění. Lineární regrese má rovnici přímky $y=1.55+x*-0.10$ (95 % konfidenční interval je $-0.10--0.11$) a $r^2=0.10$, korelace je signifikantní $p<0.001$.

Jak je názorně vidět, hustota zalidnění má jen malý vliv na natalitu, vztah je téměř lineární a vysvětluje jen malé množství variability. Diagnostické grafy zde vzbuzují velké podezření na porušení předpokladů lineární regrese, robustní model zde však vychází stejně podobně metodě nejmenších čtverců tak jako u ostatních lineárních závislostí zkoumaných v této práci.

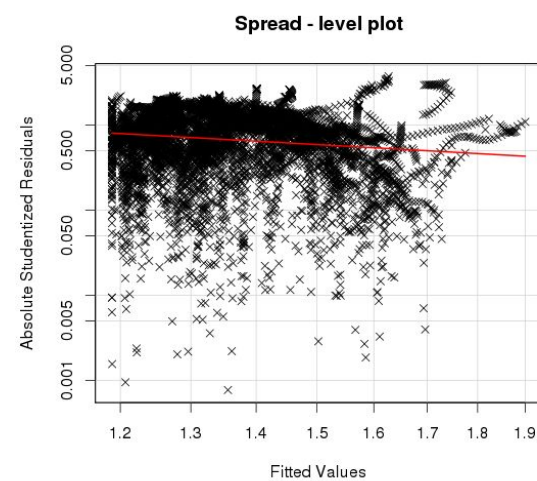
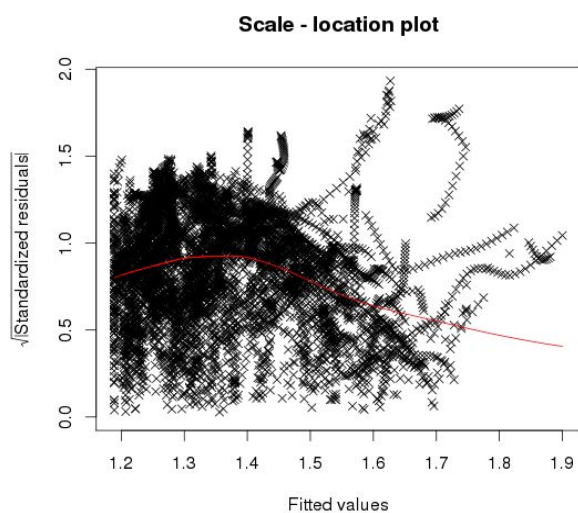
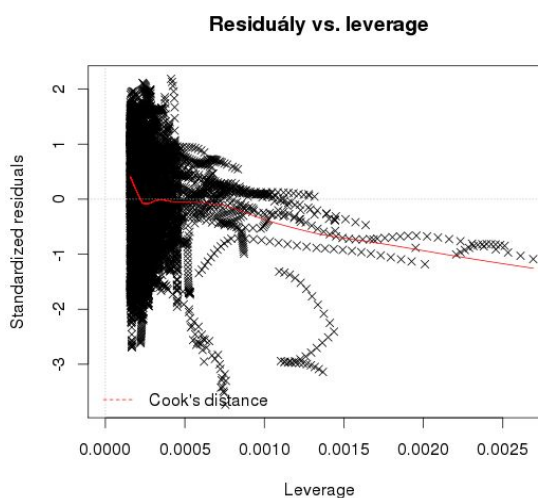
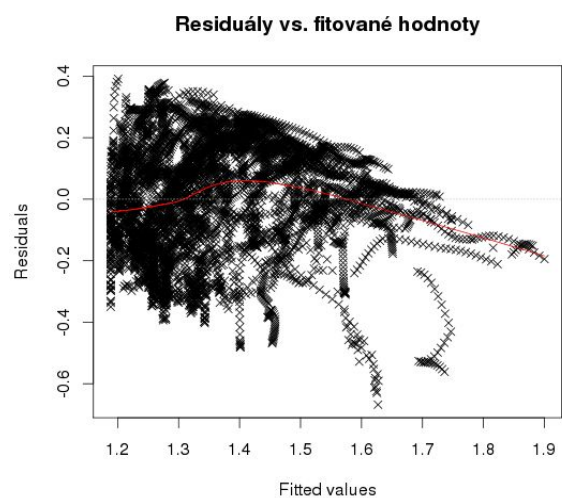
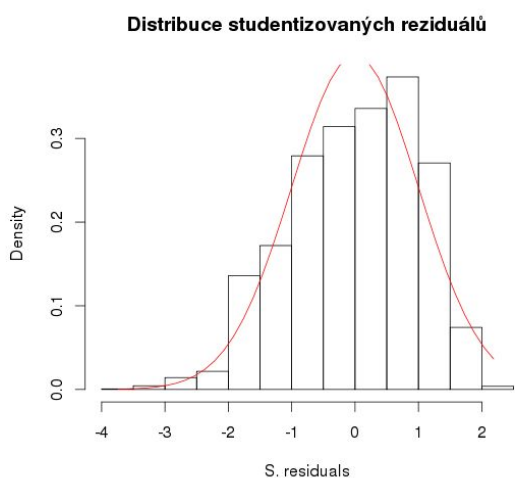
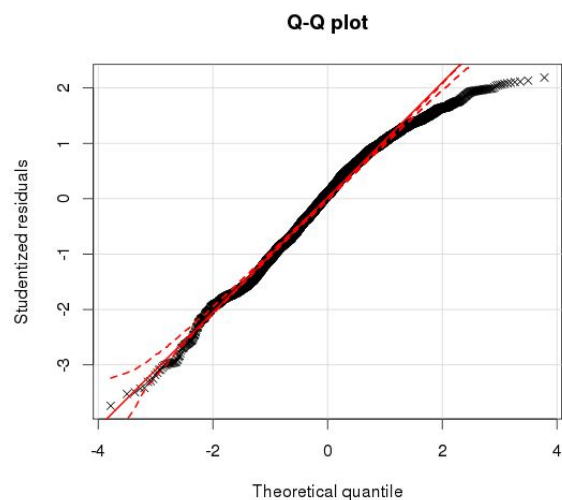


Obr. 9.1–9.6 Diagnostické grafy pro lineární regresi z Obr. 9



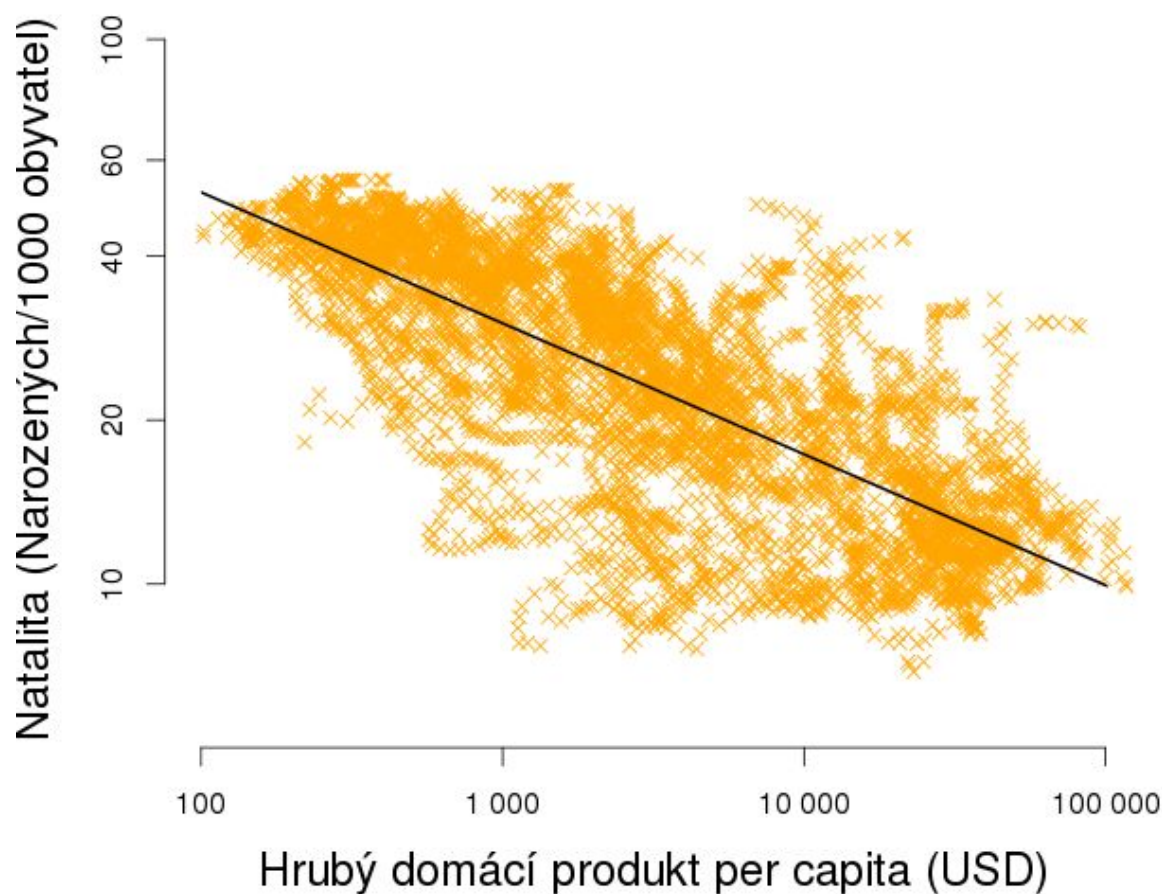
Obr. 10 Závislost natality na procentu lidí žijících ve městech. Lineární regrese má rovnici přímky $y=2.23+x*0.52$ s (95 % konfidenční interval je 0.50-0.54) a $r^2=0.35$, korelace je signifikantní $p<0.001$.

Závislost mezi natalitou a urbanizací je také slabá, překvapivě je ale mnohem silnější, než mezi natalitou a hustotou zalidnění. Tento fakt stojí za pozornost, vezmeme-li v úvahu jak omezeným parametrem urbanizace je ze své podstaty - nedává nám představu o tom, jak vlastně města v dané zemi vypadají, jaká je jejich hustota zalidnění, jaká je intenzita lidských kontaktů či infrastruktury nashromážděná v daném městě.



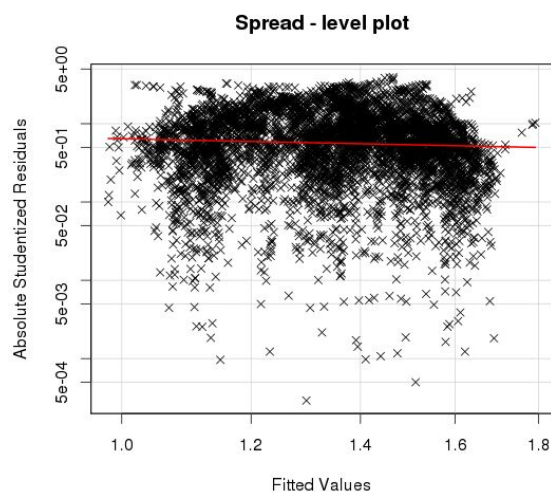
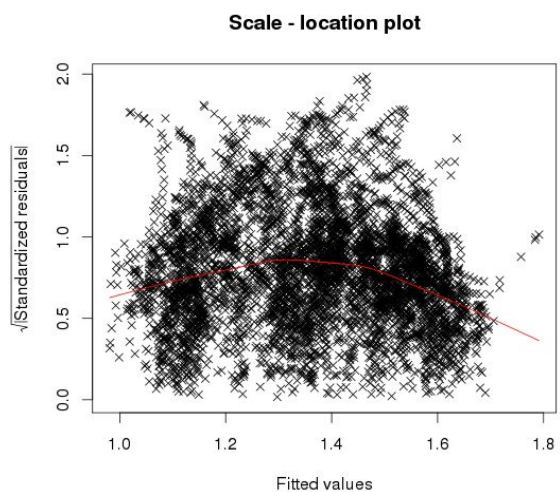
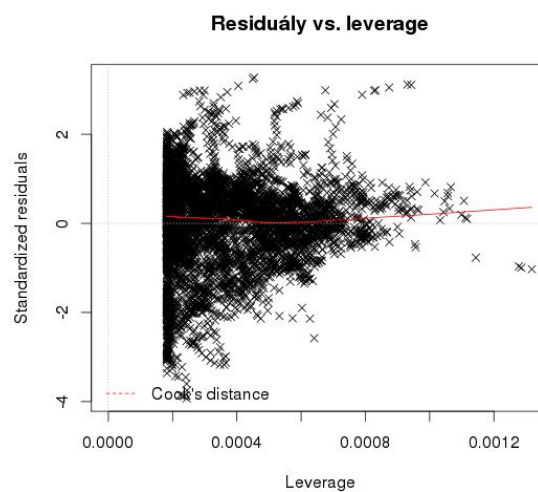
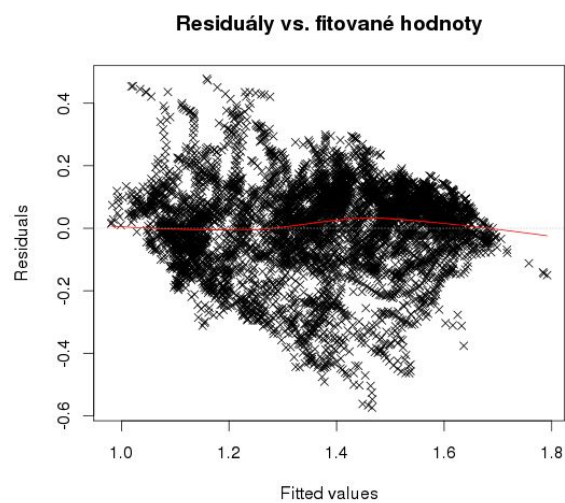
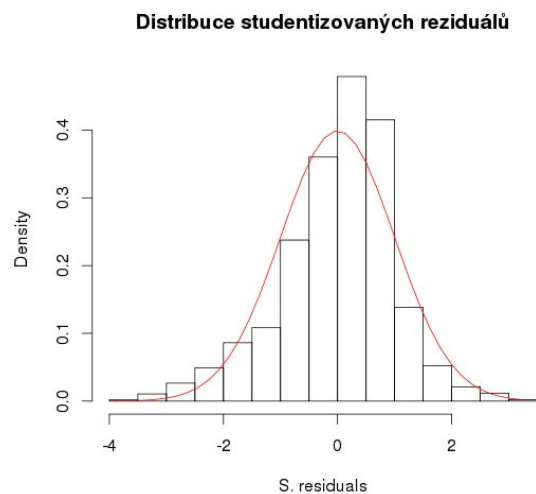
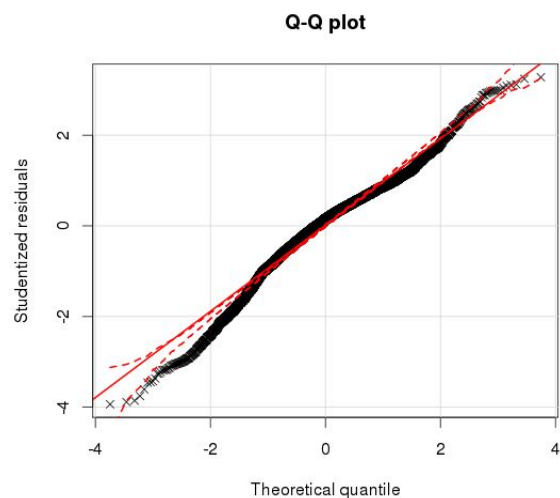
Obr. 10.1-10.6 Diagnostické grafy pro lineární regresi z Obr. 10

4.3 Allometrie porodnosti a metabolismu

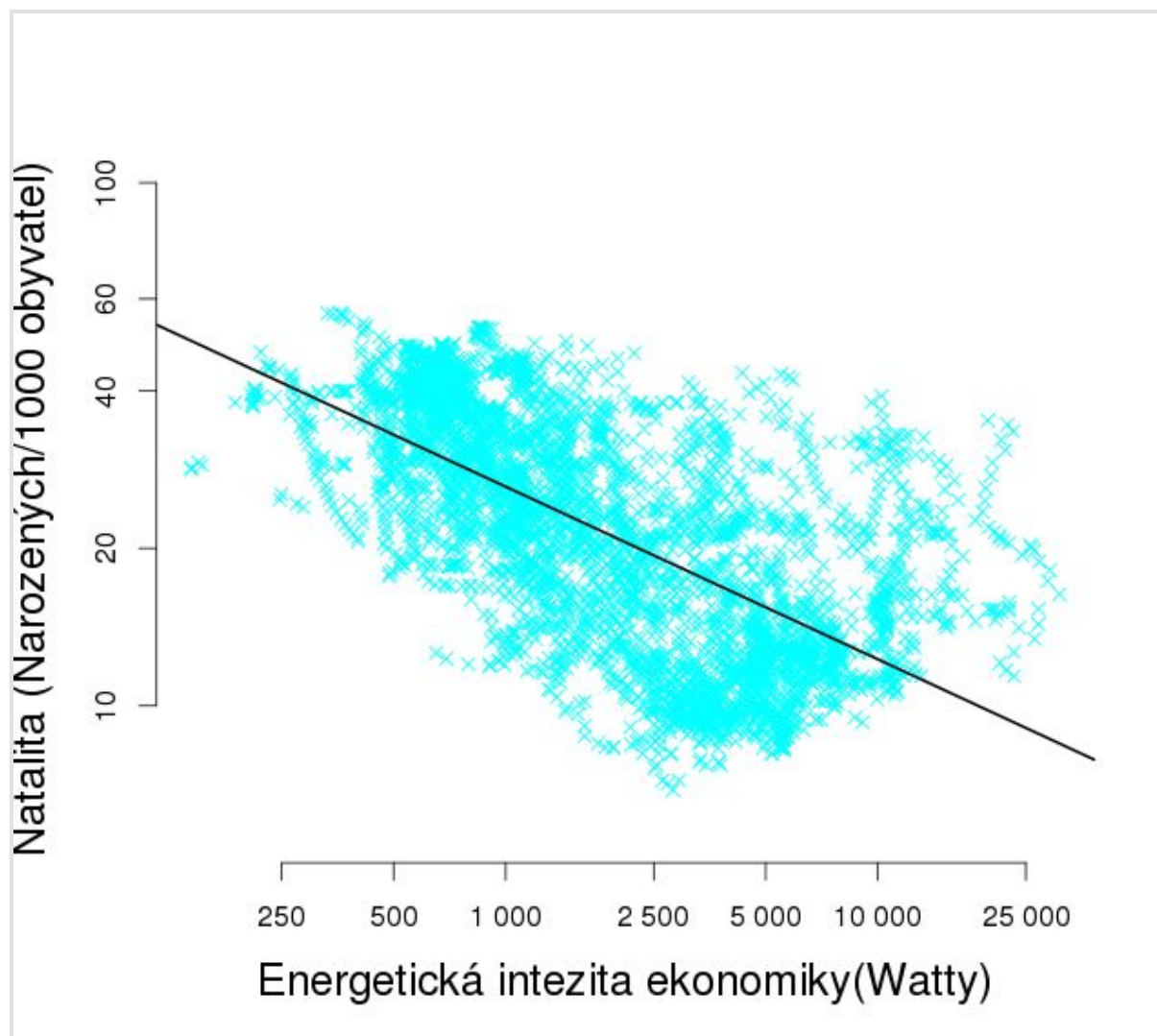


Obr 11. *Závislost natality na hrubém domácím produktu per capita. Lineární regrese má rovnici přímky $y=2.2+x^{-0.24}$ a $r^2=0.57$, korelace je signifikantní $p<0.001$.*

Jak můžeme vidět, exponent rovnice vztahu mezi HDP a natalitou je -0.24 jak vychází z předpokladů v (Moses & Brown, 2003) a (Brown et al. 2001) a ne -0.33 jak tvrdil (Bauch, 2008). Tento exponent se nevejde ani do 95% konfidenčního intervalu -0.23--0.25 který mi vyšel a musím tedy odmítnout Bauchovo tvrzení o exponentu jako neplatné

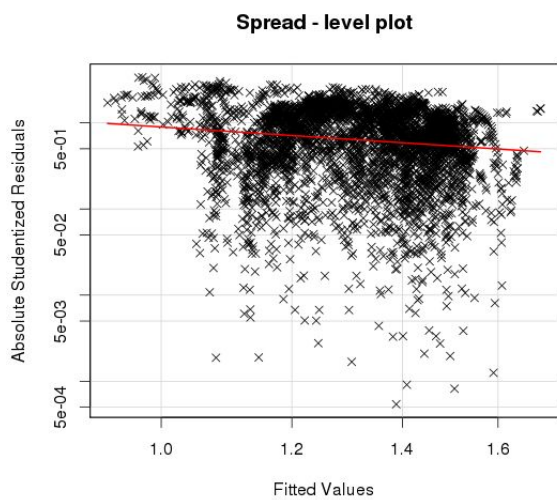
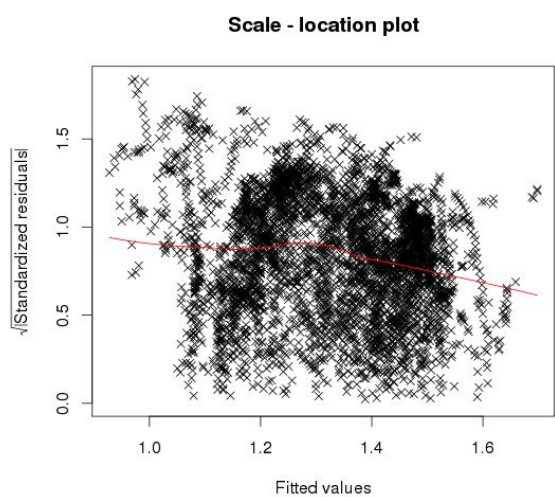
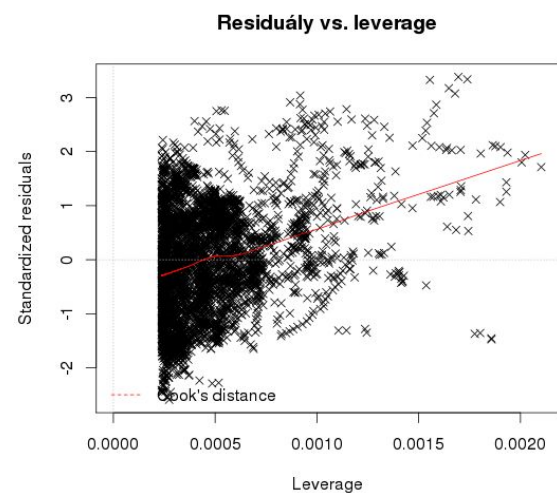
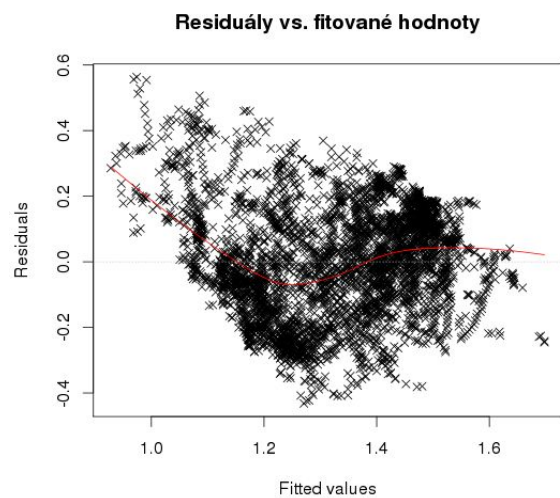
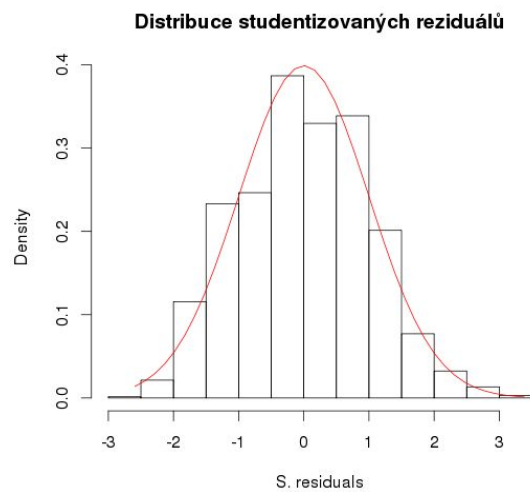
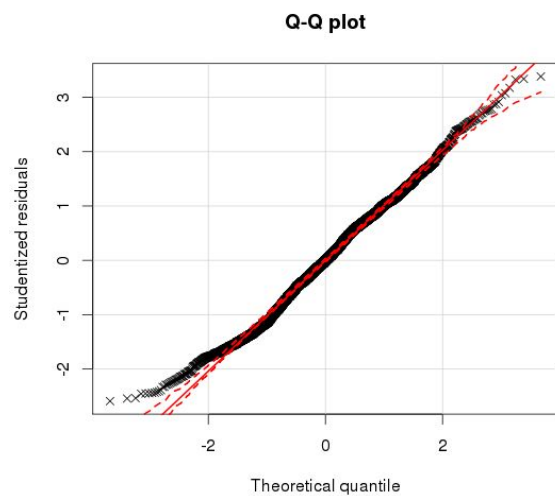


Obr. 11.1–11.6 Diagnostické grafy pro lineární regresi z Obr. 11



Obr 12. Závislost natality a EIE. Lineární regrese má rovnici přímky $y=2.4+x*-0.33$ (95% konfideční interval je $-0.32--0.34$) a $r^2=0.42$ korelace je signifikantní $p<0.001$.

Pokud se rozhodneme prověřit ještě tvrzení z (Moses & Brown, 2003) o závislosti natality a EIE, dojdeme k stejnému exponentu jako autoři původní studie.



Obr. 12.1-12.6 Diagnostické grafy pro lineární regresi z Obr. 12

5. Diskuze

Nepotvrdily se původní předpoklady Brown et al. (2011) o tom, že všechny sektory ekonomiky budou škálovat stejným způsobem a jsou tedy všechny vystavěny na stejném principu kvazifraktálních rozvodových sítí, který v konečném důsledku představuje omezení pro fungování ekonomiky z hlediska dostupné energie.

Stejně tak se nepotvrdily představy o andělském růstu kde sektor služeb bude vyvázan z fyzické infrastruktury a díky nehmotným součástem ekonomiky (jako jsou například datové služby) bude moci růst bez toho, aniž by byl omezován fyzickými i fyzikálními omezeními které svazují průmysl a zemědělství.

Ačkoli se to může zdát ve zpětném pohledu poměrně nepřekvapivé, nakonec se tím sektorem který se chová jiným způsobem ukázalo zemědělství, které pořád stále závisí na takových jevech jakým je teplota - a můžeme předpokládat že těmi dalšími budou srážky, kvalita půdy atd.

Moje výsledky samozřejmě nenaznačují že zemědělství *není* omezeno nějakou kvazifraktální rozvodnou sítí - jen že takováto případná struktura se řídí jinými pravidly než ta, která omezuje růst průmyslu a služeb.

Stejně tak fakt, že služby škálují podobným způsobem jako průmysl v závislosti na energii neznamena popření Bettencourt et al. 2007, naopak. Služby a průmysl jsou dvě stránky jedné mince která existuje ve městech díky zvýšené koncentraci lidí.

To je důvodem proč procento lidí žijících ve městě je na těchto jevech závislejší (nebo naopak) než hustota zalidnění měřená v rámci státu nebo teritoria. Rozvoj socioekonomické aktivity vyžaduje vysokou koncentraci lidí, která bude udržovat v chodu a rozšiřovat vysoce strukturované prostředí. Tato vysoká hustota koncentrovaná na jednom místě, je mnohem důležitější než celková rozprostřenost obyvatelstva i po těch místech kde lidé nejsou, nebo je jich málo, jak se to při výpočtu populační hustoty děje a proto i informace o tom, kolik lidí žije ve městech - aniž bychom měli představu o populační hustotě, tedy o tom, jak intenzivní

jsou sociální kontakty na daném místě - je lepší než údaj o hustotě zalidnění neboť v případě lidí ve městech můžeme vysokou (nebo vyšší) hustotu předpokládat.

Právě strukturace fyzického prostředí člověkem pomocí extrametabolické energie, která se udržuje v čase, je dle mého názoru jedním ze slepých míst ekologie (porovnej ale Odling-Smee et al. 2003). Ne že by se jí nevěnovala pozornost, ale je prakticky vždy považována za problém narušující přírodní struktury a systémy. Ty jsou, proti těm lidským, považovány za efemerické, termodynamicky nestabilní jevy (srovnej např. Miko & Storch 2015, Schramski et al. 2015), jako by papír který právě držíte v ruce (nebo obrazovka na kterou se díváte) byl podobný plameni ohně, který přemění energii z jedné formy na druhou, zvýší entropii vesmíru a tím to hasne.

Přitom lidmi vytvořené sociotechnické sítě nenasávají jen energii a materiály z (doposud) nelidské přírody a nejsou jen destruktivním činitelem, ale vstupují s ní do kontaktu a stejně jako v ekosystémech neexistuje nějaké předem předjednaná harmonie neměnných vztahů (Kauffman 1993), tak i tyto se vyvíjejí v rámci kreativních a destruktivních procesů analogických k přírodním (Schumpeter 1934), ale také se ovlivňují navzájem a stejně jako v případě ekosystémů mohou vést k evolučním novinkám.

Zásadní je proto rozdíl dvou druhů lidmi vytvořených sítí, jeden z nich existuje na venkově, kde především uzurpuje hrubou primární produkci biosféry kterou přesouvá do měst a druhý, který buduje města a přesouvá energii nutnou k jejich údržbě převážně mezi nimi. Je nutné se koukat i na kreativní stránky tohoto procesu, jinak bychom museli být zahambeni že i Thomas Malthus dokázal na člověka pohlédnou optimističtěji než současná ekologie.

6. Přehled literatury

Arbesman, S., Kleinberg, J. M., & Strogatz, S. H. (2009). Superlinear scaling for innovation in cities. *Physical Review E*, 79(1), 016115.

Bauch, C. T. (2008). Wealth as a source of density dependence in human population growth. *Oikos*, 117(12), 1824-1832.

Bettencourt, L. M., Lobo, J., Helbing, D., Kühnert, C., & West, G. B. (2007). Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. *Proceedings of the national academy of sciences*, 104(17), 7301-7306.

Bettencourt, L. M. (2013). The origins of scaling in cities. *Science*, 340(6139), 1438-1441.

Brown, James H., James F. Gillooly, Andrew P. Allen, Van M. Savage, and Geoffrey B. West. Toward A Metabolic Theory Of Ecology. *Ecology* 85 (2004): 1771-789.

Brown, J. H., Burnside, W. R., Davidson, A. D., DeLong, J. P., Dunn, W. C., Hamilton, M. J., Mercado-Silva, N., Nekola, J., Okie, J., Woodruff, W. & Zuo, W. (2011). Energetic limits to economic growth. *BioScience*, 61(1), 19-26.

Burnside, W. R., Brown, J. H., Burger, O., Hamilton, M. J., Moses, M., & Bettencourt, L. (2012). Human macroecology: linking pattern and process in big-picture human ecology. *Biological Reviews*, 87(1), 194-208.

[EIA] (2015). International energy statistics. US Energy and Information Administration, Washington, DC
<http://www.eia.gov/beta/international/>

Ellis, M. A., & Trachtenberg, Z. (2014). Which Anthropocene is it to be? Beyond geology to a moral and public discourse. *Earth's Future*, 2(2), 122-125.

Ellis, E. C. (2015). Ecology in an anthropogenic biosphere. *Ecological Monographs*, 85(3), 287-331.

[FAO] (2012) Food security UN Food and Agriculture

Organization http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/documents/food_security_statistics/FoodConsumptionNutrients_en.xls

Farrell-Gray, Catherine C., and Nicholas J. Gotelli.
Allometric Exponents Support A 3/4-Power Scaling Law. *Ecology* 86
(2005): 2083-087.

DeLong, J. P., J. G. Okie, M. E. Moses, R. M. Sibly, and J. H. Brown. Shifts in metabolic scaling, production, and efficiency across major evolutionary transitions of life. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (2010): 12941-2945.

Isaac N. J. B., Carbone C.: Why are metabolic scaling exponents so controversial? Quantifying variance and testing hypotheses, *Ecology Letters* 13, 728-735, 2010.

Honaker, J., & King, G. (2010). What to do about missing values in time-series cross-section data. *American Journal of Political Science*, 54(2), 561-581.

Hunt, E. K. (2015). History of economic thought: a critical perspective. ME Sharpe.

Kauffman, S. A. (1993). The origins of order: Self organization and selection in evolution. Oxford University Press, USA.

Kolokotronis T., Savage V., Deeds E. J., Fontana W.: Curvature in metabolic scaling, *Nature* 464, 753-756, 2010.

Lan, L., Lian, Z., Pan, L., & Ye, Q. (2009). Neurobehavioral approach for evaluation of office workers' productivity: The effects of room temperature. *Building and Environment*, 44(8), 1578-1588.

Lan, L., Wargocki, P., & Lian, Z. (2011). Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort. *Energy and Buildings*, 43(5), 1057-1062.

Lepš, J., & Šmilauer, P. (2003). Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge university press.

Malthus, T. R. (1809). An essay on the principle of population, as it affects the future improvement of society

Marshall, A. (2009). Principles of economics: unabridged eighth edition. Cosimo, Inc.

Miko L. & Storch D. 2015. Biodiversity conservation under energy limitation: Possible consequences of human productivity appropriation for species richness, ecosystem functioning, and food production. Ecosystem Services 16: 146-149

Moses M. E, Brown J. H (2003) Allometry of human fertility and energy use. Ecol Let 6: 295-300.

Nash, K. (2001). The Cultural Turn'in Social Theory: Towards a Theory of Cultural Politics. Sociology, 35(1), 77-92.

Nekola, J.C., C.D. Allen, J.H. Brown, W.R. Burnside, A.D. Davidson, T.S. Fristoe, M.J. Hamilton, S.T. Hammond, A. Kodric-Brown, N. Mercado-Silva, and J.G. Okie. 2013. The Malthusian-Darwinian dynamic and the trajectory of civilization. Trends in Ecology and Evolution 28:127-130.

Odling-Smee, F. J., Laland, K. N., & Feldman, M. W. (2003). Niche construction: the neglected process in evolution (No. 37). Princeton University Press.

O'Connor, Michael P., Stanley J. Kemp, Salvatore J. Agosta, Frank Hansen, Annette E. Sieg, Bryan P. Wallace, James N. McNair, and Arthur E. Dunham. Reconsidering the mechanistic basis of the metabolic theory of ecology. Oikos 116 (2007): 1058-072.

Palsson, G., Szerszynski, B., Sörlin, S., Marks, J., Avril, B., Crumley, C., Hackmann, H., Holm, P., Ingram, J., Kirman, A. & Buendía, M. P. (2013). Reconceptualizing the 'Anthropos' in the Anthropocene: Integrating the social sciences and humanities in global environmental change research. Environmental Science & Policy, 28, 3-13.

Payne JE . 2010. Survey of the international evidence on the causal relationship between energy consumption and growth. Journal of Economic Studies 37: 37-53.

Richerson, P. J., & Boyd, R. (1998). The evolution of human ultra-sociality. Indoctrinability, ideology, and warfare: Evolutionary perspectives, 71-95.

Schramski, J. R., Gattie, D. K., & Brown, J. H. (2015). Human domination of the biosphere: Rapid discharge of the earth-space battery foretells the future of humankind. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(31), 9511-9517.

Schumpeter, J. A. (1934). *The theory of economic development: An inquiry into profits, capital, credit, interest, and the business cycle* (Vol. 55). Transaction publishers.

Smil V . 2008. *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*. MIT Press.

West, G. B., J. H. Brown, and B. J. Enquist. 1997. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science* 276:122-126

West, G. B., J. H. Brown, and B. J. Enquist. 1999. The fourth dimension of life: fractal geometry and allometric scaling of organisms. *Science* 284:1677-1679.

White, Craig R., Phillip Cassey, and Tim M. Blackburn. Allometric Exponents Do Not Support A Universal Metabolic Allometry. *Ecology* 88 (2007): 315-23.

[WB] World Bank Group (Ed.). (2015). *World Development Indicators 2015*. World Bank Publications.
<http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>

Zalasiewicz, J., Williams, M., Smith, A., L. Barry, T., L. Coe, A., R. Bown, P., Brenchley, P., Cantrill, D., Gale, A., Gibbard, P., Gregory, F.J., Hounslow, M.W., Kerr, A.C., Pearson, P., Knox, R., Powell, J., Waters, C., Marshall, J., Oates, M., Rawson, P., Stone, P. (2008), Are we now living in the Anthropocene? *GSA Today* 18 (2): 4-8.